



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL Y DE RIESGO AMBIENTAL  
DE UNA PLANTA PILOTO DE DIGESTIÓN ANAEROBIA DE  
RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS MUNICIPALES.**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**HUGO MARTÍNEZ CERVANTES**



**MÉXICO, D.F.**

**2014**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor: José Antonio Ortiz Ramírez

**VOCAL:** Profesor: Joaquín Rodríguez Torreblanca

**SECRETARIO:** Profesor: Alfonso Durán Moreno

**1er. SUPLENTE:** Profesor: Néstor Noé López Castillo

**2º SUPLENTE:** Profesor: Manuel Miguel López Ramos

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**TORRE DE INGENIERÍA, 3ER PISO, ALA SUR**

---

**ASESOR DEL TEMA:**

**Dr. Alfonso Durán Moreno**

---

(Nombre y firma)

**SUSTENTANTE:**

**HUGO MARTÍNEZ CERVANTES**

---

(Nombre y firma)

“El riesgo es la oportunidad de descubrir nuevos horizontes”

# AGRADECIMIENTOS.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y su fundación por el apoyo otorgado durante mis estudios en la Facultad de Química. Es un orgullo y responsabilidad muy grande ser parte de ella.

Agradecimiento especial para Beatriz Cervantes Piña, mi madre, sin ella llegar hasta aquí no hubiera sido posible.

Agradezco al Dr. Alfonso Durán Moreno por la oportunidad de trabajar en el proyecto "Generación de un Sistema Piloto de Tratamiento de Residuos Sólidos Orgánicos Municipales" y también por la oportunidad de formar parte del equipo de trabajo en ingeniería ambiental.

Y por el apoyo otorgado en dicho proyecto agradezco al Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico Tecnológico y de Innovación (FORDECYT) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Al Maestro Israel Islas, a la Ingeniera Marcela Estupiñan y a la Dra. Martha Roa por su apoyo, asesorías, revisiones, comentarios, experiencias compartidas y tiempo brindados que sin duda enriquecieron este trabajo, ¡Muchas gracias! Al grupo de trabajo de la torre de ingeniería: Diana Casas, Arturo Moreno, Julio Santiago, Mauro Aguilar, Daniel Mireles y todos (la lista es larga).

A la profesora Imelda Velázquez Montes, por su apoyo como tutora durante el transcurso de mis estudios en la Facultad de Química. Y a todas las y los profesores que me impartieron clases y me guiaron por los caminos de conocimiento y aprendizaje de la Ingeniería Química.

A mis amigos José Alberto, Ivan, José Ignacio, Diego Rodrigo, Pedro Omar, Alfonso, Adrián, Diego Torres, y Karina quienes me compartieron su tiempo, sus risas, pláticas y conocimientos durante esta etapa.

Gracias también a la Dra. Rosa María Gutiérrez Zamora y al equipo de trabajo del Instituto de Ingeniería, en este nuevo ciclo de oportunidades y aprendizaje.

Y si alguna vez escuchas en el viento mis palabras,  
Si alguna vez miras en el desierto mis ojos,  
Si alguna vez sientes de nuevo mis manos,  
Es por qué ahí estaré,  
A la luz de las estrellas respirando el aire de la noche,  
Mientras el sonido recorre mis venas y mi alma se inunda de ti!

**“Evaluación de Impacto Ambiental y de Riesgo Ambiental de una Planta Piloto de Digestión Anaerobia de Residuos Sólidos Orgánicos Municipales.”**

(Tesis).



## ÍNDICE.

---

<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
1.1 Justificación .....	3
1.2 Objetivos .....	4
1.2.1 Objetivo general .....	4
1.2.2 Objetivos particulares .....	4
1.3 Alcances .....	5
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>6</b>
2.1 La tendencia en la gestión de RSU.....	6
2.2 Generación, composición y gestión de RSU en México .....	7
2.3 El impacto ambiental de la disposición final de RSU .....	11
2.4 Alternativa de tratamiento de la FORSU .....	13
2.5 Antecedentes de la digestión anaerobia de RSOM .....	13
2.6 Principios básicos de la digestión anaerobia .....	14
2.7 Descripción de la tecnología para el tratamiento de RSOM.....	18
2.8 Sistemas de digestión anaerobia de RSOM.....	19
2.9 Tecnologías comerciales para plantas de DA de RSOM.....	21
2.10 Desventajas y ventajas de la DA.....	22
2.11 Importancia de las evaluaciones de impacto ambiental y de riesgo .....	24
2.12 La evaluación de impacto ambiental.....	26
2.13 Riesgo.....	29
2.14 La evaluación de impacto ambiental.....	33



<b>3. MARCO LEGAL .....</b>	<b>35</b>
3.1 Leyes y reglamentos en materia de EIA y ERA .....	36
3.2 Listados de actividades altamente riesgosas (LAAR) .....	40
3.3 Normas oficiales mexicanas (NOM) .....	41
3.4 Normas mexicanas, internacionales y de referencia .....	42
<b>4. METODOLOGÍA .....</b>	<b>45</b>
4.1 Principales modelos para la evaluación de impacto ambiental .....	45
4.1.1 Listas de verificación (checklist) .....	45
4.1.2 Modelo de matriz .....	46
4.1.3 Modelo de valor de índice .....	46
4.1.4 Modelo descriptivo de análisis de recursos .....	47
4.1.5 Diagramas de redes .....	47
4.1.6 Modelos computacionales de simulación .....	47
4.2 Metodología para la EIA del caso de estudio .....	48
4.2.1 Fase 1: Listas de verificación .....	49
4.2.2 Fase 2: Diagrama de causa-efecto .....	50
4.2.3 Fase 3: Matriz de EIA .....	51
4.2.4 Fase 4: Cálculo de la magnitud de impacto .....	54
4.2.5 Fase 5: Presentación de resultados .....	62
4.2.6 Fase 6: Análisis y conclusiones .....	62
4.3 Principales métodos para la evaluación de riesgo ambiental .....	63
4.4 Metodología para la evaluación de riesgo del caso de estudio .....	66
<b>5. DESARROLLO DE LAS EVALUACIONES Y RESULTADOS.....</b>	<b>70</b>
5.1 Evaluación de impacto ambiental .....	70
5.1.1 Diagramas de causa-efecto .....	70



5.1.2	Matriz de evaluación de impacto .....	75
5.1.3	Propuestas de medidas de prevención y mitigación .....	93
5.2	Evaluación de riesgo ambiental.....	94
5.2.1	Identificación de materiales y agentes químicos .....	94
5.2.2	Peligros asociados a la operación de plantas de DA .....	96
5.2.3	Descripción del riesgo de fuga de la planta de DA .....	97
5.2.4	Zonas de protección en las instalaciones de la planta de DA.....	100
5.2.5	Descripción del riesgo a la salud por la exposición a H <sub>2</sub> S.....	102
5.2.6	Criterios para implementar medidas de seguridad, prevención y mitigación.	103
5.2.7	Matriz de gestión del riesgo para plantas de DA para el tratamiento de la FORSU. ....	104
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>111</b>
<b>7.</b>	<b>REFERENCIAS Y ANEXOS.....</b>	<b>114</b>
7.1	Referencias.....	114
7.2	Anexos.....	123



## Índice de figuras

Figura 1.	Distribución porcentual de los tipos de sitios de disposición final de RSU en México en 2010. Adaptado de (INEGI, 2012) .....	8
Figura 2.	Manejo de RSU en México. Fuente: (INECC, 2012) .....	9
Figura 3.	Composición de los RSU en México. Adaptado de (INECC, 2012) .....	9
Figura 4.	Agua contaminada infiltrándose al subsuelo en la planta de composta de Bordo Poniente. Adaptado de (Palacios González, 2011) .....	11
Figura 5.	Rutas de conversión bioquímica en la digestión anaerobia. Adaptado de (Rapport et al., 2008; Cavinato, 2011) .....	16
Figura 6.	Parámetros que afectan <b>la digestión anaerobia de RSOM</b> .....	17
Figura 7.	Diagrama de Proceso <b>de DA de RSOM</b> .....	19
Figura 8.	Clasificación de las características <b>de los sistemas de DA</b> .....	20
Figura 9.	<b>Factores componentes del ambiente</b> .....	25
Figura 10.	Restricciones básicas de un proyecto. Adaptado de (PMI, 2008) .....	31
Figura 11.	Expresión básica para calcular el Riesgo .....	31
Figura 12.	Representación de la estructura jurídica en México adaptada en la pirámide jurídica de Adolf Julius Merkl (1890-1970) y Hans Kelsen (1881-1973) .....	35
Figura 13.	Artículos que establecen la base para la regulación ambiental.....	36
Figura 14.	Leyes y Reglamentos Federales a consultar para la EIA y ERA de <b>RSOM</b> .....	37
Figura 15.	Artículos de la LGEEPA y LGPGIR que establecen la competencia en materia de RSM .....	38
Figura 16.	Metodología para la evaluación de impacto ambiental .....	48
Figura 17.	Diagrama para la identificación de impactos ambientales .....	51
Figura 18.	Ejemplo de la calificación de cada casilla de la Matriz de Evaluación de Impacto .....	54
Figura 19.	Magnitud del impacto a partir de la calificación cualitativa .....	60
Figura 20.	Metodología para la evaluación de riesgo del caso de estudio .....	66
Figura 21.	Diagrama de identificación de impactos factores abióticos .....	72
Figura 22.	Diagrama de identificación de impactos (Factores Bióticos) .....	73
Figura 23.	Diagrama de identificación de impactos (Factores Antrópicos de percepción) .....	74



Figura 24.	Matriz de evaluación de impacto para la digestión anaerobia (Parte 1: etapa de construcción; factores abióticos y Bióticos) .....	77
Figura 25.	Matriz de evaluación de impacto para la digestión anaerobia (Parte 2: etapa de construcción; factores antrópicos) .....	78
Figura 26.	Matriz de evaluación de impacto para la digestión anaerobia (Parte 3: etapa de operación; Factores abióticos y bióticos) .....	79
Figura 27.	Matriz de evaluación de impacto para la digestión anaerobia (Parte 4: etapa de operación; Factores antrópicos) .....	80
Figura 28.	Sustancias y materiales en el proceso de DA de RSOM .....	94
Figura 29.	Esquema simplificado de los diversos incidentes que pueden ocurrir en caso de existir una fuga. Fuente: (Casal Fàbrega & Vilchez Sánchez, 2010) .....	98
Figura 30.	Límites de explosión a 25°C para mezclas de diferentes gases. Fuente: (Deublein & Steinhauser, 2008) .....	99
Figura 31.	Definición de las cuatro zonas de peligro de explosión. Adaptado de (Bradfer, 2002) .....	100
Figura 32.	Esquema de ejemplo para una zona explosiva con gases. Adaptado de (Asconumatics, 2012) .....	101



## Índice de tablas

---

Tabla 1.	Cantidad total de FORSU tratada en las plantas de composta del D.F.....	10
Tabla 2	Generación per cápita de RSU en el Distrito Federal y el Estado de <b>México en 2010 y 2011</b> .....	10
Tabla 3.	Enfermedades relacionadas con RSU urbanos transmitidas por <b>vectores</b> .....	12
Tabla 4	Reacciones químicas que ocurren en la degradación acetogénica y en la etapa <b>de metanogénesis</b> .....	16
Tabla 5.	Reacciones de reducción de sulfatos en sulfuro de hidrógeno .....	17
Tabla 6	Propiedades típicas del biogás .....	18
Tabla 7	Ejemplos de plantas de digestión anaerobia de tratamiento de <b>RSOM a gran escala</b> .....	21
Tabla 8	Clasificación de impactos ambientales por sus características .....	27
Tabla 9.	Fuentes de peligro.....	34
Tabla 10.	Sustancias inflamables y explosivas involucradas en Actividades <b>Altamente Riesgosas</b> .....	40
Tabla 11.	Normas oficiales mexicanas aplicables a la EIA y ERA .....	42
Tabla 12.	Normas de referencia emitidas por el Estado de México en materia de residuos sólidos urbanos .....	43
Tabla 13.	Estándares internacionales relacionados con la seguridad en <b>procesos químicos</b> .....	44
Tabla 14.	Lista de verificación de los factores y sus elementos susceptibles de <b>impacto</b> .....	50
Tabla 15.	Ponderación numérica <b>a cada criterio de evaluación</b> .....	55
Tabla 16.	Ponderación asignada a los factores abióticos, sus elementos y atributos afectados .....	55
Tabla 17.	Ponderación asignada a los factores bióticos, sus elementos y <b>atributos afectados</b> .....	56
Tabla 18.	Ponderación asignada <b>a los factores antrópicos</b> .....	56
Tabla 19.	Descripción y ponderación de las actividades en la etapa de construcción de <b>la planta de digestión anaerobia</b> .....	57
Tabla 20.	Descripción y ponderación de las actividades en la etapa de <b>construcción de un relleno sanitario</b> .....	58



Tabla 21.	Descripción y ponderación de las actividades en la etapa de operación de una <b>planta de digestión anaerobia</b> .....	59
Tabla 22.	Descripción y ponderación de las actividades en la etapa de <b>operación de un relleno sanitario</b> .....	59
Tabla 23.	Actividades globales para la <b>etapa de construcción</b> .....	60
Tabla 24.	Actividades globales para la <b>etapa de operación</b> .....	60
Tabla 25.	Modalidades de estudios de riesgo aplicables a las actividades altamente riesgosas por su nivel <b>de complejidad</b> .....	65
Tabla 26.	Niveles de <b>riesgo</b> .....	69
Tabla 27.	Número total de impactos obtenidos en la evaluación de la digestión <b>anaerobia y del relleno sanitario</b> .....	75
Tabla 28.	Total de impactos de la digestión anaerobia y del relleno sanitario obtenidos de la <b>evaluación de impacto ambiental</b> .....	76
Tabla 29.	Magnitud de impacto global de la planta de digestión anaerobia y del <b>relleno sanitario en cada etapa</b> .....	81
Tabla 30.	Magnitud del impacto de cada tecnología en los factores abióticos, bióticos y antrópicos <b>en la etapa de construcción</b> .....	82
Tabla 31.	Magnitud del impacto de cada tecnología en los factores abióticos, bióticos y antrópicos <b>en la etapa de operación</b> .....	83
Tabla 32.	Magnitud de impacto de las actividades de la digestión anaerobia vs relleno sanitario <b>en los factores abióticos</b> .....	84
Tabla 33.	Magnitud de impacto de las actividades de la digestión anaerobia vs relleno sanitario <b>en los factores bióticos</b> .....	87
Tabla 34.	Magnitud de impacto de las actividades de la digestión anaerobia vs relleno sanitario en los factores antrópicos 1: paisaje, ruido y <b>olores</b> .....	89
Tabla 35.	Magnitud de impacto de las actividades de la digestión anaerobia vs relleno sanitario en los factores antrópicos 2(seguridad industrial y salud ocupacional) y antrópicos 3(socio- <b>económicos</b> ) .....	92
Tabla 36.	Identificación de impactos en el sitio .....	93
Tabla 37.	Información general de las composiciones de biogás a partir de <b>diferentes fuentes</b> .....	95
Tabla 38.	Composición típica del <b>biogás obtenido de RSOM</b> .....	95
Tabla 39.	Sustancias contaminantes <b>en el biogás y sus efectos</b> .....	96
Tabla 40.	Condiciones <b>de operación del biodigestor</b> .....	97



Tabla 41.	Peligros más comunes en centros de trabajo que involucran procesos químicos .....	97
Tabla 42.	Efectos a la salud por <b>exposición a sulfuro de hidrógeno</b> .....	103
Tabla 43.	Información de población potencialmente <b>afectable</b> .....	103
Tabla 44.	Matriz de gestión de riesgo. Sección 1: identificación de la fuente, el daño y la descripción del evento .....	105
Tabla 45.	Matriz de gestión de riesgo. Sección 2: identificación del receptor y vía de exposición o transporte .....	106
Tabla 46.	Matriz de Gestión de Riesgos. Sección 3 Juicio: Probabilidad de exposición, consecuencia y magnitud del riesgo .....	107
Tabla 47.	Matriz de gestión de riesgo Sección 4: Acciones para la prevención o mitigación del riesgo .....	109



## Resumen

---

El desarrollo de esta tesis, fue hecho como parte de la ejecución del **Proyecto: “Generación de un sistema piloto de tratamiento de residuos sólidos orgánicos municipales (RSOM)”**, que la **Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México**, desarrolla en conjunto con las siguientes entidades de la universidad: el Instituto de Investigaciones Sociales, el Instituto de Ingeniería y el Programa Universitario del Medio Ambiente.

Dicho proyecto se realiza en atención a una de las demandas que las entidades de la región centro (Distrito Federal, Estado de México y Morelos) establecen por medio del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y el Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico Tecnológico y de Innovación (FORDECYT), con el objetivo de responder de manera integral a los problemas, necesidades y oportunidades que se plantean en la demanda correspondiente.

La tecnología que se ha elegido en el proyecto para el procesamiento de los residuos sólidos orgánicos es la digestión anaerobia (DA). Por lo que en este trabajo se realizó la evaluación conceptual del impacto ambiental que se puede generar debido a la construcción y operación de una planta de este tipo. Asimismo se realizó un análisis cualitativo de riesgos para plantas de DA.

En síntesis, uno de los propósitos finales a corto plazo, de este trabajo, es construir una base para la elaboración de un plan de gestión de riesgo para la planta piloto que se va a construir y operar, en el cuál se incluyan medidas para prevenir, mitigar o controlar el impacto al ambiente y la seguridad en las instalaciones de dicha planta.





## 1. INTRODUCCIÓN

---

En el capítulo uno del presente trabajo, se establece la justificación del estudio en dónde se plantea la problemática y el área de oportunidad. Asimismo, para que esta importante función sustantiva encuentre su cauce, se establece la línea base que son los objetivos y alcances sobre los cuales la investigación y desarrollo de las evaluaciones estarán delimitadas.

En virtud de lo anterior, en el capítulo dos se describe el marco teórico que recopila la información general de los temas principales: RSOM, digestión anaerobia (DA), evaluación de impacto ambiental (EIA) y evaluación de riesgo ambiental (ERA).

Continuando con este proceso, se reconoce que es indispensable establecer el marco legal para las Evaluaciones de Impacto y Riesgo de un sistema de tratamiento de RSOM, que es desarrollado en el capítulo tres.

Como columna vertebral de las evaluaciones en el capítulo cuatro se presenta la descripción de la metodología que garantiza la validez y la confiabilidad del conocimiento que se generó para las Evaluaciones de Impacto y Riesgo Ambiental.

Enseguida en el capítulo cinco se presenta una de las partes esenciales, que está conformada por el desarrollo de las evaluaciones, la presentación de los resultados y análisis de los mismos.

Finalmente en el capítulo seis se reúnen las conclusiones del trabajo realizado.





## 1.1 Justificación

---

La problemática inherente a la obsolescencia en el manejo de la creciente generación de residuos sólidos urbanos (RSU<sup>1</sup>), requiere de la implementación de procesos que contribuyan a reducir los impactos dañinos para el ambiente a través del tratamiento y aprovechamiento de este tipo de residuos. Actualmente, existe una gran variedad de nuevos procesos que están siendo aplicados, principalmente en Europa, desde hace varias décadas.

No obstante, como establece el Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos el Distrito Federal, adoptar una o varias alternativas implica contar con un fuerte respaldo técnico y económico que justifique la decisión, ya que en muchos casos están involucrados inversiones y costos de operación elevados (GDF, 2010).

Uno de los proyectos existentes en la materia, pretende realizar la instalación de una planta piloto de digestión anaerobia para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos municipales, con el objetivo de estudiar el proceso y la factibilidad económica y técnica para la implementación en un futuro de plantas de mayor escala, bajo las condiciones y restricciones existentes en el entorno.

Entre las ventajas de la DA se encuentra que los productos principales del proceso tienen usos que traen beneficios. En primer lugar, el biogás puede ser utilizado como combustible en vehículos, para cocinar alimentos; o también para generar energía eléctrica. El digestato, generado del proceso, con alto contenido de nutrientes, puede ser empleado en el mejoramiento de suelos de áreas urbanas, agrícolas y áreas de conservación.

---

<sup>1</sup> Con la publicación de la LGPGIR en el DOF en octubre de 2003, a partir de 2004, lo que se conocía como residuos sólidos municipales, pasa a ser residuos sólidos urbanos. En esta tesis se empleará el término "municipales" y "urbanos" indistintamente.





Asimismo, la DA provee no sólo una fuente alterna de energía, también una alternativa para el manejo de los residuos orgánicos que contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de los rellenos sanitarios (Mata-Alvarez J, 2000; Frigon JC, 2010; Lo Níee Liew, 2012).

La justificación de realizar la evaluación de impacto y riesgo ambiental de la planta piloto de digestión anaerobia se debe porque al implementar un **proceso "nuevo"** de tratamiento de residuos sólidos orgánicos se requiere además una evaluación que determine cuáles serán los impactos y posibles riesgos en la salud de la población y el ecosistema al igual que el establecimiento de las medidas de seguridad para prevenir las posibles consecuencias adversas y las acciones para controlar o mitigar los posibles efectos nocivos.

## 1.2 Objetivos

---

A continuación se describen los objetivos de este trabajo.

### 1.2.1 Objetivo general

- o Realizar el estudio de evaluación del impacto ambiental y el análisis de riesgo de una planta piloto de digestión anaerobia para tratar residuos sólidos orgánicos municipales, a partir de la evaluación conceptual de la DA como método de tratamiento de RSOM.

### 1.2.2 Objetivos particulares

- o Estructurar una metodología de evaluación de impacto ambiental (EIA) y de evaluación de riesgo ambiental (ERA), que se adecuen al caso de estudio.
- o Establecer el marco legal para las evaluaciones de impacto y riesgo de un sistema de digestión anaerobia para el tratamiento de RSOM.





- o Realizar el análisis cualitativo y cuantitativo de impacto ambiental para un sistema de digestión anaerobia de RSOM.
- o Determinar cuáles serán los impactos y riesgos más importantes asociados a plantas de DA de RSOM.
- o Establecer propuestas de prevención y mitigación de impactos ambientales.
- o Proponer recomendaciones para la gestión de los riesgos más significativos, que contribuyan a la elaboración de un plan de gestión de riesgo.

### 1.3 Alcances

---

- o Las evaluaciones de impacto y riesgo ambiental abarcarán las siguientes etapas: construcción y operación de una planta de DA.
- o Para tener un marco de comparación del impacto de la digestión anaerobia, como método de tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), también se realizará la evaluación de impacto del relleno sanitario, que actualmente es el principal método de disposición de RSU en México.
- o Se identificarán los peligros asociados con la seguridad, la salud y afectación al ambiente.
- o Se construirá una tabla de gestión de riesgo para una planta de digestión anaerobia.





## 2. MARCO TEÓRICO

---

A continuación se desarrolla el marco teórico. En la primera parte se aborda la situación de los RSOM. Después, se describen los temas relacionados a digestión anaerobia y por último se especifican los temas respectivos con las evaluaciones de riesgo e impacto.

### 2.1 La tendencia en la gestión de RSU

---

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) establece que los RSU son aquellos generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por la LGPGIR como residuos de otra índole (DOF, 2013).

Habitualmente, sólo una parte de los RSU es rescatada ya que tienen un valor comercial en el reciclaje (cartón, plástico, vidrio, aluminio, entre los más comunes).

En general, los residuos sólidos municipales (RSM) como también se les conoce a los RSU, pueden ser divididos en las siguientes subfracciones (Braber, 1995):

- Fracción orgánica digestible: materia orgánica biogénica, la cual es fácilmente degradable, por ejemplo: residuos de alimentos y residuos de jardín. Alrededor del 50% de los RSM se compone de esta fracción.





- Fracción orgánica combustible: materia orgánica con digestión lenta y aquella que no es digestible, por ejemplo: madera, papel, cartón, plástico y otros materiales sintéticos.
- Fracción inerte: piedras, arena, vidrio, metales, huesos.

En muchos lugares los RSM se recolectan mezclados y son dispuestos en rellenos sanitarios, de esta forma no se aprovecha el potencial de cada una de las fracciones. Esto junto al acelerado aumento en su generación, hace evidente la necesidad de implementar procesos más eficaces y eficientes.

La tendencia que se sigue a nivel internacional es la concepción de centros integrales de tratamiento para RSU, en donde se sugiere aprovechar la mayor parte de ellos. Se trata de sitios con infraestructura y equipamiento necesarios, en donde circulan de forma separada los residuos (materia prima) hacia instalaciones con varios procesos de recuperación, reúso y reciclado, en el caso de los inorgánicos, y con áreas para el composteo de la fracción orgánica, o la generación de biogás que es empleado para generar energía eléctrica que sustituye el uso de combustibles derivados del petróleo.

En Europa, el avance en la política de gestión de este tipo de residuos implica que los rellenos sanitarios ya no serán una opción en las próximas décadas. Los rellenos sanitarios, finalmente se convertirán en la última forma de disposición de unos pocos residuos (Hadjibiros, *et al.*, 2011), los que no sean valorizables

## 2.2 Generación, composición y gestión de RSU en México

En México, a pesar de que en materia ambiental ahora se tiene un marco regulatorio dirigido a prevenir y disminuir la generación de RSU, éste no

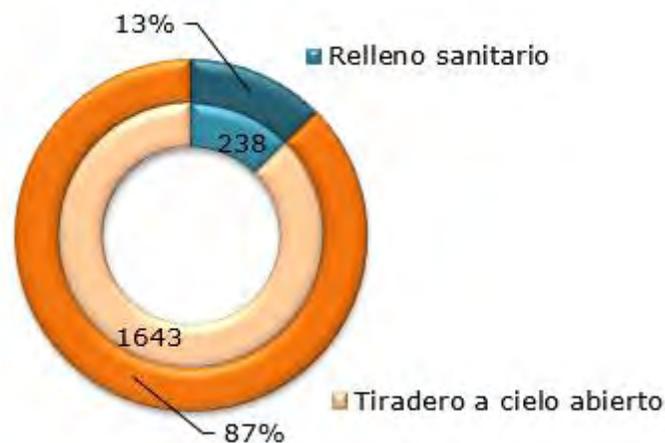




es suficiente para enfrentar los desafíos implicados en el manejo de la gran cantidad generada día a día.

Esto debido a que el desarrollo hecho en los últimos años en el área, ha estado orientado a una gestión tradicional en la cual la disposición final continúa siendo la principal opción de tratamiento.

Como indican los datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) presentados en la Figura 1, en 2010 el destino de los RSU de los 2 456 municipios (incluidas las delegaciones del D.F.) fue en 1 643 tiraderos a cielo abierto y en 238 rellenos sanitarios.

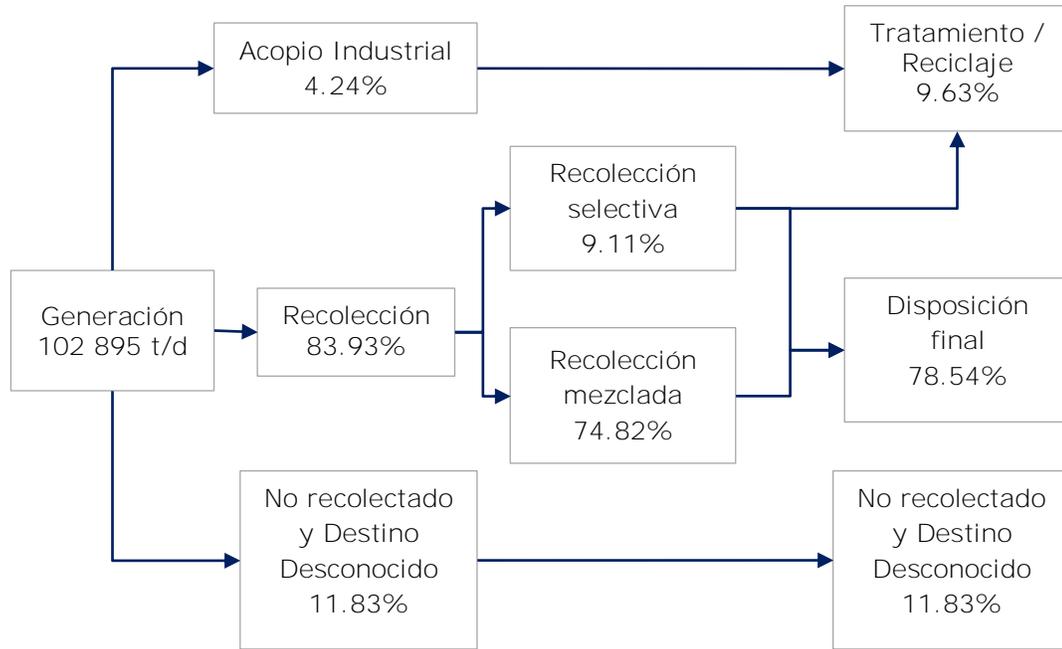


**Figura 1.** Distribución porcentual de los tipos de sitios de disposición final de RSU en México en 2010. Adaptado de (INEGI, 2012)

En cuanto a generación de RSU en el país, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) recopila los datos más recientes reportados en los programas estatales de prevención y gestión integral de residuos; mostrados en la Figura 2. La generación estimada es de 102 895 t/d, de las cuales se recolecta el 83.93%.

Se estima que 62 288 t/d de RSU fueron enviadas a rellenos sanitarios mientras que 16 395 t/d fueron enviadas a tiraderos a cielo abierto (INECC, 2012).





**Figura 2.** Manejo de RSU en México. Fuente: (INECC, 2012)

De la misma forma, el INECC (2012) reporta que la composición de estos residuos es 46.6% materia orgánica, 31.2% materiales susceptibles de aprovechamiento y el resto 22.2% se trata de otros materiales (considerados no aprovechables aún); estos datos están representados en la Figura 3.

Si 46.6% de los RSU es la fracción orgánica, ¿Qué es lo que se hace con esta fracción? En el Distrito Federal sólo una cantidad de la fracción orgánica es tratada en plantas de composta, el resto es enviada a disposición final.



**Figura 3.** Composición de los RSU en México. Adaptado de (INECC, 2012)





La Tabla 1, contiene un resumen de la cantidad de fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos que ingreso a las plantas de composta del D.F., la cantidad de composta producida y la cantidad que se comercializó de 2008 a 2012, conforme a los inventarios de RSU del Distrito Federal.

**Tabla 1.** Cantidad total de FORSU tratada en las plantas de composta del D.F.

Disposición de FORSU	2008	2009	2010	2011	2012
	t/año				
Capacidad Instalada de Recepción.	80151	79 911	78 739	736 749	916 980
Cantidad de Ingreso	37 869	35 089	41 753	611 906	872 045
Producción Composta	10 897	8 082	11 536	120 211	167 830
Composta Entregada	<u>4829</u>	<u>8 887</u>	<u>3 899</u>	<u>18 320</u>	<u>12 657</u>

**Fuente:** Adaptado de Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal de 2008, 2009, 2010 y 2011 (SMA, 2008; SMA, 2009; SMA, 2010; SMA, 2011; SMA, 2012)

En lo que respecta a la generación diaria de RSU por habitante se estimó que a nivel nacional es de 1.00 kg. En el Distrito Federal y el Estado de México, en 2011 la generación fue de 1.51 y 1.19 kg respectivamente como se muestra en la Tabla 2. Mientras que en 2012, se estima que la generación de residuos por habitante al día fue de 1.52 kg en el D.F., como se reporta en la Base de Datos Estadísticos del Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (BADESNIARN).

**Tabla 2.** Generación Per cápita de RSU en el Distrito Federal y el Estado de México en 2010 y 2011.

Variable	t/d	Habitantes	GPC [kg/hab/día]	
Entidad / Año	2010		2011	
Distrito Federal	13 250	8 851 080	1.50	1.51
Estado de México	17 765	15 175 862	1.17	1.19

**Fuente:** Adaptado de (INEGI, 2010; BADESNIARN, 2012)



### 2.3 El impacto ambiental de la disposición final de RSU

Actualmente, el destino de los RSU en México es en los rellenos sanitarios, sin embargo, el tratamiento en rellenos sanitarios sufre serias desventajas (Nyns & Gendebien, 1992; Chugh, *et al.*, 1999; Trzcinski, 2009), los daños típicos son:

- La contaminación de acuíferos y aguas superficiales por lixiviados producidos durante la fermentación de los residuos orgánicos.

La Figura 4, es una imagen tomada en el relleno sanitario de Bordo Poniente, en dónde se observa la acumulación de agua durante el periodo de lluvias.



**Figura 4.** Agua contaminada infiltrándose al subsuelo en la planta de composta de Bordo Poniente. Adaptado de (Palacios González, 2011)

- La contaminación de grandes extensiones de suelo destinados a disposición final, que generan un pasivo ambiental al concluir su tiempo de vida útil.
- Las emisiones de polvo y partículas.
- Emisiones incontroladas de gases de efecto invernadero a la atmósfera producidos por los RSU. A nivel mundial, el 12% de las emisiones de metano provienen de los rellenos sanitarios, por lo que es la tercera





fuerza más grande de emisiones de metano de origen humano (U.S. EPA, 2006).

No hay que olvidar las afectaciones a la población por ruido, malos olores, y transmisión de enfermedades debido a la generación de vectores como insectos y roedores (mosquitos, moscas, cucarachas, ratas). Algunas de las enfermedades relacionadas con los RSU transmitidas por vectores están enlistadas en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Enfermedades relacionadas con RSU urbanos transmitidas por vectores.

Vectores	Principales enfermedades	Forma de transmisión
Ratas	Peste bubónica, Tifus murino, Leptospirosis	A través del mordisco, orina y heces. A través de las pulgas que viven en el cuerpo de la rata.
Moscas	Fiebre tifoidea, Salmonelosis, Cólera, Amibiasis, Disentería, Giardiasis.	Por vía mecánica (a través de las alas, patas y cuerpo). A través de heces y saliva
Mosquitos	Malaria, Leishmaniosis, Fiebre amarilla, Dengue, Filariosis	A través de la picazón del mosquito hembra.
Cucarachas	Fiebre tifoidea, Cólera, Giardiasis.	Por vía mecánica (a través de alas, patas y cuerpo) y por las heces.
Cerdos y ganado	Cisticercosis, Toxoplasmosis, Triquinosis, Teniasis	Por ingestión de carne contaminada.
Aves	Toxoplasmosis	A través de las heces

**Fuente:** Adaptado de (DESA/UFMG, 1995 citado en BID, 1997; y Acurio, *et al.*, 1997)

Por lo anterior, la disposición final de los RSU en rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto representa un grave riesgo de contaminación del suelo, aire, aguas superficiales y subterráneas, así como el riesgo de afectación a la salud de la población.





## 2.4 Alternativa de tratamiento de la FORSU

---

Debido a que hay pocos lugares aptos para la construcción de rellenos sanitarios, se requiere de nuevas instalaciones y métodos de tratamiento sostenibles para tratarlos y no sólo deshacerse de ellos, sino de aprovecharlos; en el mundo la opción elegida ha sido la producción de biogás a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.

La FORSU es la materia de interés, porque es más factible emplear esta fracción para obtener productos de gran valor económico que arrojarla al ambiente. En México, representan cerca del 47% de la composición de los RSU, como se mostró en la gráfica de la Figura 3.

Al procesar la fracción orgánica, por un lado se contribuye a resolver la problemática de la gestión de RSU y su disposición final y por otro se fomenta el uso de energías alternativas que contribuyen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Ejemplo de ello es el caso de **Noruega, en ese país, "recientemente el uso de biogás como combustible vehicular se ha hecho muy popular. Hoy, hay sitios de abastecimiento de biogás en Oslo, Stavanger y Fredrikstad (las principales ciudades de Noruega) además de aquellos con gas natural"** (ECN, 2011).

## 2.5 Antecedentes de la digestión anaerobia de RSOM

---

La digestión anaerobia no es por sí misma algo nuevo, su base es el proceso natural de descomposición biológica. Durante más de cien años la DA ha sido empleada en instalaciones de tratamiento de aguas residuales y de alcantarillado para la degradación y estabilización de lodos (Braber, 1995; Rapport, *et al.*, 2008).

En las década de 1860, se comenzó a utilizar la digestión anaerobia para el tratamiento de aguas residuales domésticas, pero con una configuración similar a un tanque séptico (McCarty, 2001).





A lo largo de varias décadas, en zonas rurales de África, China, India y otros países asiáticos como Tailandia se han empleado muchos biodigestores a escala doméstica para proveer biogás para cocinar y alumbrado (Rapport, *et al.*, 2008; Dimpl, 2010; Abbasi, *et al.*, 2012).

Otro de los campos de aplicación de la DA alrededor del mundo, ha sido en las granjas ganaderas. Las cuales generan electricidad del biogás obtenido del tratamiento del estiércol y ahorran en el pago de servicios de suministro de energía eléctrica, al mismo tiempo disminuyen los impactos ambientales provocados por las lagunas de estiércol (Rapport, *et al.*, 2008; EPA, 2009). En granjas productoras de leche, ubicadas en el norte del país, se están aplicando este tipo de plantas de biogás (EFM, 2013).

Los primeros biodigestores para obtener biogás a partir de residuos orgánicos se instalaron en Gran Bretaña en 1911 (Lobera Lössel, 2011). Sin embargo, la primera investigación en gran escala en digestión anaerobia de residuos **sólidos municipales fue "RefCom"** en E.U., la cual se inició en 1978 y cerrada a mitad de la década de los ochentas (Braber, 1995).

La mayoría de los países de la unión europea han desarrollado sistemas centralizados a gran escala para el tratamiento de residuos sólidos orgánicos municipales con generación de electricidad como un co-producto (Rapport, *et al.*, 2008). Los principales ejemplos son Alemania, Dinamarca y Noruega quienes cuentan con una vasta experiencia en el desarrollo de plantas de digestión anaerobia para RSU (Hartmann, *et al.*, 2002; Liebetrau, *et al.*, 2002).

## 2.6 Principios básicos de la digestión anaerobia

---

La materia orgánica se descompone principalmente de dos formas. En una atmósfera sin oxígeno (condiciones anaeróbicas) la materia orgánica se degrada y produce biogás: una mezcla de metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de





carbono ( $\text{CO}_2$ ). En presencia de oxígeno (condiciones aeróbicas) generalmente no se produce biogás; se produce dióxido de carbono, agua y otros compuestos orgánicos.

En virtud de lo anterior, la digestión anaerobia es un proceso biológico en el cual microorganismos degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno, esto ocurre naturalmente en nichos anaeróbicos como humedales, pantanos, en los tractos digestivos de los animales rumiantes, y además es el principal proceso de descomposición que ocurre en los rellenos sanitarios (Braber, 1995; Rapport, *et al.*, 2008).

En este proceso biológico se identifican cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis, en las cuales intervienen distintos tipos de bacterias y varias reacciones químicas.

En la etapa de hidrólisis los carbohidratos, proteínas y grasas, se descomponen para formar moléculas orgánicas solubles como los aminoácidos. La etapa siguiente es la fermentación o acidogénesis, en donde los productos son ácidos grasos como el ácido propiónico, butírico, valérico, isovalérico, capriónico entre otros (Cavinato, 2011).

Posteriormente las bacterias acetogénicas, degradan estos ácidos grasos para formar dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ). En la última etapa, intervienen las bacterias metanogénicas, las cuales producen el biogás. Algunas reacciones que tienen lugar en la acetogénesis y metanogénesis son presentadas en la Tabla 4.



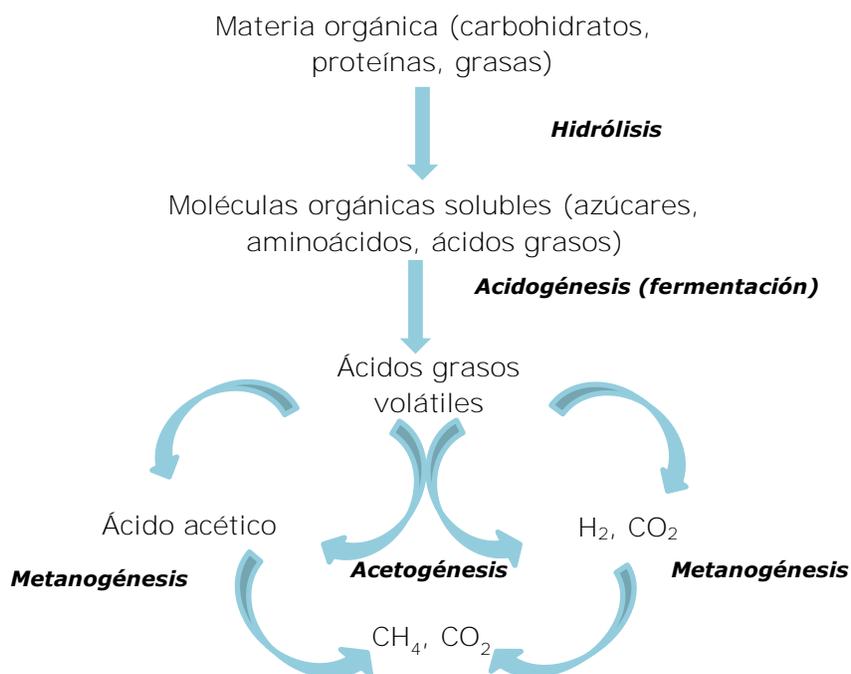


**Tabla 4.** Reacciones químicas que ocurren en la degradación acetogénica y en la etapa de metanogénesis.

Generación de ácido acético	
Ácido Propiónico	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$
Ácido Butírico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{CO}_2 + 6\text{H}_2$
Propanol	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{OH} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + \text{CO}_2 + 5\text{H}_2$
Dióxido de Carbono / Hidrógeno	$2\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{H}_2\text{O}$
Generación de metano	
Ácido Acético	$\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$
Dióxido de Carbono / Hidrógeno	$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

**Fuente:** (Deublein & Steinhauser, 2008 pp.: 96; Cavinato, 2011)

La Figura 5 muestra el esquema de conversión bioquímica de la materia orgánica en la digestión anaerobia.



**Figura 5.** Rutas de conversión bioquímica en la digestión anaerobia. Adaptado de (Rapport *et al.*, 2008; Cavinato, 2011)

Otras reacciones importantes que ocurren en la digestión anaerobia son las relacionadas con la reducción del azufre.





El azufre está presente en todos los materiales especialmente aquellos que contienen alta concentración de proteínas.

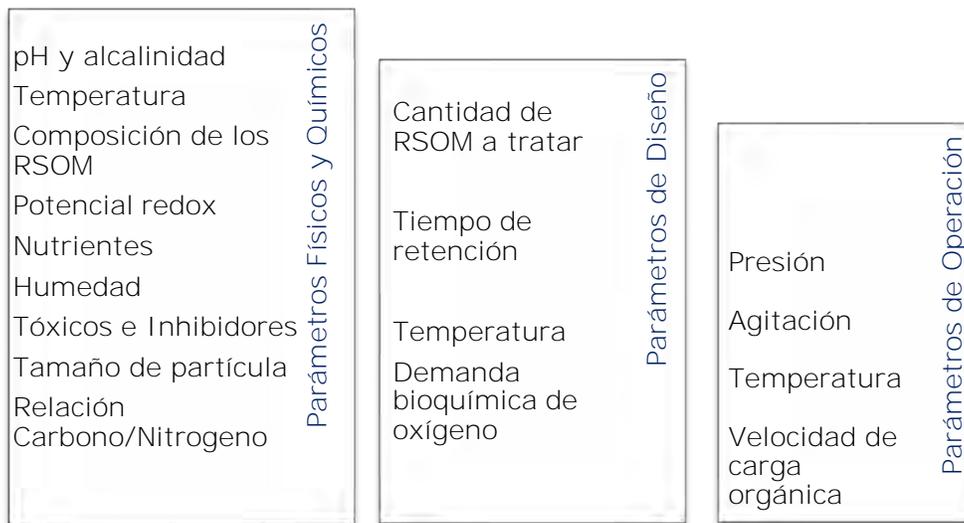
Los sulfatos presentes en el material de alimentación son reducidos a sulfuro de hidrogeno por bacterias reductoras de azufre, las cuales compiten con los organismos metanogénicos por el mismo sustrato; en la Tabla 5 son presentadas las reacciones de reducción de azufre.

**Tabla 5.** Reacciones de reducción de sulfatos en sulfuro de hidrógeno

$H_2 + SO_4^{2-} \rightarrow H_2S + H_2O$
$CH_3COOH + SO_4^{2-} \rightarrow H_2S + CO_2 + H_2O$

**Fuente:** (Cavinato, 2011)

Las condiciones necesarias para la digestión anaerobia de los RSOM, involucran los parámetros de la Figura 6.



**Figura 6.** Parámetros que afectan la digestión anaerobia de RSOM.

Los parámetros físicos y químicos son requisitos esenciales para que se lleve a cabo la DA; mientras que los, parámetros de diseño están relacionados con la construcción de equipos y finalmente parámetros que se tienen que controlar y/o monitorear durante la operación de la planta y favorecer la degradación de la materia orgánica y obtención de biogás.





## 2.7 Descripción de la tecnología para el tratamiento de RSOM

Por lo general, una tonelada de RSOM produce de 100 a 200 m<sup>3</sup> de biogás (Braber, 1995), y la composición típica y contenido energético de dicho biogás son mostrados en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Propiedades Típicas del Biogás.

Contenido Energético	20-25 MJ/m <sup>3</sup> .
Metano (%vol.).	55-70
Dióxido de Carbono (% vol.).	30-45
Sulfuro de Hidrógeno	200-4000 ppm

**Fuente:** (Braber, 1995)

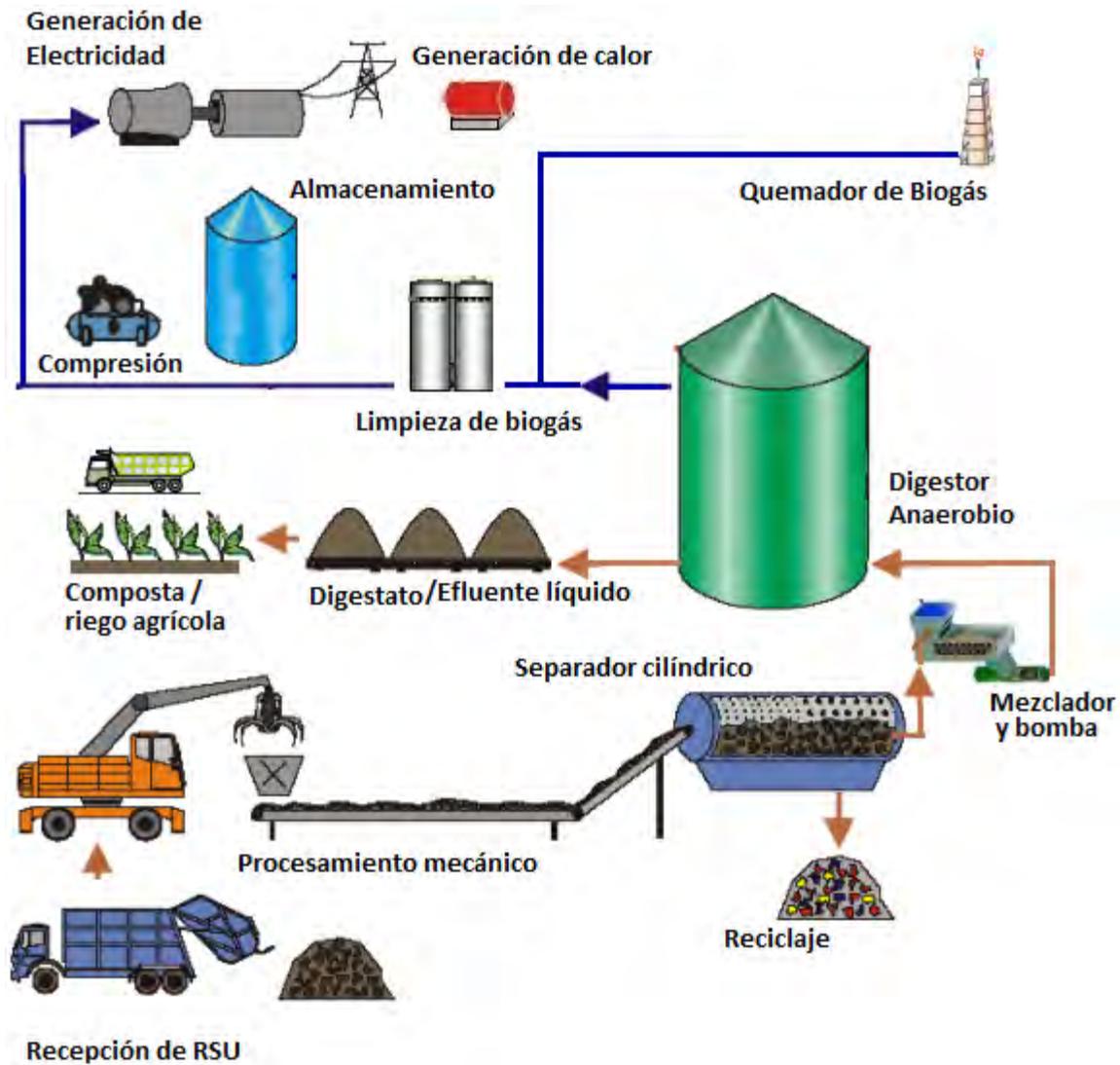
Normalmente, el proceso de digestión anaerobia para RSOM se puede dividir en las etapas de: pre-tratamiento de la materia prima, digestión del sustrato y post-tratamiento; que se refiere a la recuperación de biogás y tratamiento de los residuos generados (Braber, 1995; IEA, 2001; Vandevivere, *et al.*, 2004;).

La Figura 7 representa un esquema general de proceso de plantas de digestión anaerobia de RSOM.

El proceso inicia con la recepción de RSU, aquí uno de los aspectos clave es el pre- tratamiento en la fuente porque si no lo hay se requiere una separación mecánica de materiales que no son digestibles como plásticos, metales, vidrio, entre otros.

Lo que sigue es la alimentación del biodigestor anaerobio; dónde se lleva a cabo la degradación de los RSOM y se obtiene digestato y biogás. El biogás pasa por unos filtros, que generalmente son de óxido de hierro, para eliminar el H<sub>2</sub>S, y se transporta a tanques de almacenamiento o a motores de generación de energía; adicionalmente las plantas de biogás cuentan con un quemador que se utiliza cuando hay aumentos en la producción de biogás.





**Figura 7.** Diagrama de Proceso de DA de RSOM.

## 2.8 Sistemas de digestión anaerobia de RSOM

Un sistema de digestión anaerobia de RSOM tiene diferentes configuraciones en función de: número de etapas de proceso, tipo de biodigestor, si hay combinación de la FORSU con algún otro sustrato, por la temperatura de operación y por el contenido de sólidos: si es húmeda o seca. La Figura 8 es un esquema con una clasificación de las características que pueden tener las plantas de digestión anaerobia.





Contenido de sólidos	Tipo de alimentación	Etapas	Co-digestión	Temperatura de proceso
<ul style="list-style-type: none"><li>•Seco</li><li>•Húmedo</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•Continuo</li><li>•Semi-continuo</li><li>•Discontinuo</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•Una etapa</li><li>•Varias etapas</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•Varios sustratos</li><li>•Único sustrato</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•Psicrofílico (&lt;20°C)</li><li>•Mesofílico (30-42°C)</li><li>•Termofílico (43-55°C)</li></ul>

**Figura 8.** Clasificación de las características de los sistemas de DA.

La digestión anaerobia opera con dos sistemas de digestión básica. digestión húmeda, cuándo el porcentaje de sólidos totales del sustrato es más bajo que 15% y digestión seca, cuando el contenido de sólidos totales del sustrato está arriba del 15%, usualmente entre 20 y 40% (Al Seadi, *et al.*, 2008).

En un biodigestor de tipo continuo, la alimentación es constantemente alimentada, produciendo biogás sin interrupción por la adición de nueva materia prima.

Los biodigestores discontinuos son inicialmente alimentados con una carga de materia prima que es procesada y después es completamente removida transcurrido el tiempo de retención, para alimentar una nueva carga (Al Seadi, *et al.*, 2008).

Los biodigestores semi-continuos, tienen la flexibilidad de alimentarse al inicio y a medida que tiene lugar la reacción se va retirando productos y alimentando materia prima poco a poco de forma casi continúa.

Para conseguir sistemas más eficientes se combinan varios biodigestores en los que se separan las etapas de la digestión anaerobia.

Por ejemplo, un primer biodigestor con elevado tiempo de retención, para favorecer la hidrólisis, seguido de un biodigestor de bajo tiempo de retención que digiere la materia orgánica disuelta y los ácidos producidos en la primera etapa. Este sistema ha demostrado ser muy útil para tratar





residuos sólidos cuya etapa limitante es la hidrólisis, como en el caso de los RSU y residuos de ganado vacuno (Varnero Moreno, 2011).

En la digestión anaerobia, co-digestión es el término utilizado para describir el tratamiento combinado de varios residuos con características complementarias, siendo una de las principales ventajas de la DA, como la utilización de co-digestión de la FORSU con residuos agrícolas, con lodos de aguas residuales o desechos más específicos como grasas de origen animal o vegetal (Fernández, *et al.*, 2005).

### 2.9 Tecnologías comerciales para plantas de DA de RSOM

Diversas empresas europeas, han patentado las configuraciones de sus plantas de DA que han desarrollado. En el mercado las principales tecnologías están representadas por: Valorga, Dranco, Kompogas, BTA, entre otras; en la Tabla 7 se presentan las características de estas cuatro tecnologías:

**Tabla 7.** Ejemplos de plantas de digestión anaerobia de tratamiento de RSOM a gran escala.

Tecnología	VALORGA	DRANCO	KOMPOGAS	BTA
Etapas	1 etapa	1 etapa	1 etapa	2 etapas
Temperatura de operación	Mesofílico	Termofílico	termofílico	mesofílico
Contenido de sólidos	Seca	Seca	Seca	Húmeda
Tipo de mezclado	Mezclado por inyección de gas.	Recirculación del material digerido	Mezclado mecánico	Mezclado mecánico
Tiempo de Retención (días)	15 - 20	18 - 21	13 - 25	4-6
Pre-tratamiento	Separación mecánica	Separación en la fuente	Separación en la fuente / separación a mano	Separación en la fuente
Ubicación y año de construcción	1988 Amiens (Francia)	1992 Brecht (Bélgica)	1992 Rtimlang (Suiza)	1991 Helsingor, (Dinamarca)
Cantidad tratada (ton/año)	55,000	15,000	10,000	20,000

**Fuente:** (Braber, 1995)





## 2.10 Desventajas y ventajas de la DA

---

A continuación se mencionan algunas ventajas y desventajas de la DA citadas en la literatura, que servirán más adelante en la identificación de posibles riesgos y su impacto. Las ventajas son las siguientes:

- Evita el escurrimiento de lixiviados en las cuencas hidrológicas (Antweiler, 1995; Tchobanoglous, 2003).
- La cantidad de biosólidos es menor que la cantidad resultante de procesos de tratamiento aerobio, porque la mayor parte de materia orgánica digestible estable, se convierte a  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ . Relativamente poca energía va al crecimiento celular (McCarty, 1964; Tchobanoglous, 2003).
- El efluente rico en nutrientes se puede usar como un fertilizante para los cultivos. Los fertilizantes comerciales son caros y los procesos para su fabricación son insostenibles. El efluente de la digestión anaerobia contiene nitrógeno y fósforo que se puede usar como un fertilizante para los cultivos agrícolas (Mara, 1989; Smil, 1999; Tchobanoglous, 2003; Jonsson, 2004).
- Disminución de las emisiones de metano a la atmósfera. El metano tiene un potencial de calentamiento global veintiún veces mayor que el dióxido de carbono (Edwards, 2004; Cakir, 2005; Kandlikar, 2011; World Health Organization., 2011).

Las desventajas de la DA son:

- En primer lugar, la digestión anaerobia a pequeña escala requiere la adición de agua (Sharma & Pellizzi, 1991) Esto puede representar una dificultad en algunos lugares durante la época de estiaje.





- Requiere más tiempo para poner en marcha el proceso, porque las reacciones metanogénicas tienen cinéticas de crecimiento más lentas (Rowse, 2011).
- La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es un método para medir la cantidad de materia biodegradable disuelta o suspendida en el efluente de digestato, con altas concentraciones de DBO, se debe evitar la descarga directa en los cuerpos de agua (Rowse, 2011), para evitar una posible contaminación.
- Puede requerir la adición de alcalinidad (en la forma de bicarbonato de sodio) para llegar a los niveles de 2000 – 3000 mg/L de  $\text{CaCO}_3$  con el fin de mantener un pH óptimo (Rowse, 2011).
- Las velocidades de reacción en los procesos de DA son mucho más sensibles a los cambios en la temperatura (Tchobanoglous, *et al.*, 2003). Por esta razón, se recomienda que la temperatura no debe variar arriba de 0.5 °C/d (Vesilind, 1998).
- Los mayores costos están asociados al volumen del biodigestor pues se requiere un volumen más grande para el tratamiento anaerobio, además de infraestructura adicional necesaria para la captura de metano y el uso de energía (Rowse, 2011).
- Muchas sustancias pueden inhibir la producción de biogás, y es porque las bacterias metanogénicas, productoras de metano, suelen ser las más sensibles y primeras en ser afectadas. Las sustancias inhibidoras pueden entrar en el proceso, ya sea porque no hay una separación de las fracciones de los RSU o se pueden formar durante la degradación de una sustancia inicialmente no inhibidora (Schnürer & Jarvis, 2009).
- El efecto de una sustancia tóxica puede variar, y el proceso puede responder de diferentes maneras, dependiendo de factores tales como la concentración de sustancias inhibidoras, tiempo de retención, la temperatura, el pH, la concentración y el tipo de





microorganismos presentes (Schnürer & Jarvis, 2009). Puede haber una mayor producción de gases corrosivos y olores (Tchobanoglous, *et al.*, 2003).

- Si el residuo digerido se utiliza como fertilizante, trazas de diversas sustancias tóxicas también pueden afectar negativamente a los microorganismos del suelo (Schnürer & Jarvis, 2009).
- Si hay una liberación incontrolada de biogás, el metano y el aire pueden formar una mezcla explosiva la cual puede hacer combustión espontánea a altas temperaturas (Tchobanoglous, *et al.*, 2003).
- El metano y el dióxido de carbono son gases inodoros y durante la digestión anaerobia se produce sulfuro de hidrógeno el cual huele a huevo podrido sin embargo al depurar el biogás a través de óxido de hierro es probable que el biogás no tenga ningún olor (GTZ/EnDev, 2010). Esto es peligroso, ya que al haber una fuga en el recipiente de almacenamiento o en la línea de biogás es posible que no sea detectada rápidamente; es importante mencionar que el metano en concentraciones elevadas causa asfixia (Rowse, 2011).

### 2.11 Importancia de las evaluaciones de impacto ambiental y de riesgo

En la labor de preservación del ambiente, la preocupación surge con todas aquellas actividades del ser humano que puedan alterar el entorno donde vive y su calidad de vida, ya sea en forma directa o indirecta (Espinoza, 2002).

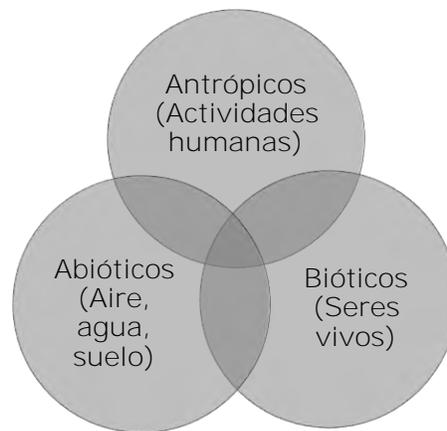
En este punto, es imprescindible conocer los elementos que constituyen al ambiente, dichos elementos se clasifican en tres grupos, que en este trabajo se denominan factores ambientales y son los siguientes: factores bióticos, abióticos y antrópicos.





Los factores abióticos (no biológicos) son los diferentes elementos que determinan el espacio físico en el cual habitan los seres vivos como lo son: el aire, agua y suelo. Los factores bióticos (o biológicos), representan a todos los seres vivos del ecosistema. Los factores antrópicos (o antropogénicos) se refieren a los procesos y actividades que son originados por el ser humano.

Es importante enfatizar que estos factores interactúan entre sí todo el tiempo; en la Figura 9 se representa la interrelación de cada grupo de elementos constituyentes del ambiente.



**Figura 9.** Factores componentes del ambiente.

Entonces la dimensión ambiental debe analizarse en un sentido amplio, tanto en sus aspectos naturales (suelo, aire, agua, flora y fauna) como de contaminación a los mismos; en los aspectos de valor paisajístico, de alteración de costumbres humanas y de impactos sobre la salud de las personas (Espinoza, 2002).

Por ello, la evaluación es el proceso en el que se emite un juicio sobre la tolerabilidad del peligro y su impacto y por tanto de su aceptabilidad. Implica la toma de decisiones al respecto, en función de factores como:

- Criterios legales
- Disponibilidad o madurez de la tecnología





- Aspectos económicos y financieros
- Afectación a los ecosistemas
- Componentes políticos, sociales (expectativas de los grupos de interés), culturales y éticos.

Entre las herramientas más relevantes que existen para esa tarea, se encuentran las evaluaciones de impacto y riesgo ambiental. Cuyo propósito es no sólo prevenir y mitigar los problemas relacionados con la degradación del ambiente, es asegurar que los recursos de un proyecto sean utilizados de la forma más eficientemente posible para incorporar mecanismos de control de riesgos que faciliten la toma de decisiones (PMI, 2008).

## 2.12 La evaluación de impacto ambiental

En la legislación mexicana la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) define impacto ambiental como la modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza.

Existen diversos tipos de impactos ambientales, pero fundamentalmente por su origen se pueden clasificar en los provocados por (DGIRA, 2012):

1. El aprovechamiento de recursos naturales ya sean renovables, tales como el aprovechamiento forestal o la pesca; o no renovables, tales como la extracción del petróleo o minerales.
2. Contaminación. Todos los proyectos que producen algún residuo (peligroso o no), emiten gases a la atmósfera o vierten líquidos al ambiente.
3. Ocupación del territorio. Los proyectos que al ocupar un territorio modifican las condiciones naturales por acciones tales como desmonte, compactación del suelo y otras.





Además, existe la clasificación de impactos ambientales enfocada a sus características, descritos en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Clasificación de impactos ambientales por sus características.

Tipo	Descripción.
Positivo o Negativo	En términos del efecto resultante en el ambiente.
Directo o Indirecto	Si es causado por alguna acción del proyecto o es resultado del efecto producido por la acción Son directos si involucran pérdida parcial o total de un recurso o su deterioro (contaminar aguas, talar bosques.). Son indirectos cuando inducen y /o generan otros deterioros sobre el ambiente (erosión antrópica, inundaciones.).
Acumulativo	Es el efecto que resulta de la suma de impactos ocurridos en el pasado o que están ocurriendo en el presente.
Sinérgico	Se produce cuando el efecto, conjunto de impactos, supone una incidencia mayor que la suma de los impactos individuales.
Residual	El que persiste después de la aplicación de medidas de mitigación.
Temporal o Permanente	Si es por un período determinado o es definitivo.
Reversible o Irreversible	Dependiendo de la posibilidad de regresar a las condiciones originales.
Continuo o Periódico	Dependiendo del período en que se manifieste.

**Fuente:** (DGIRA, 2012; Espinoza, 2002)

Es en el estudio de evaluación de impacto ambiental donde se integra la identificación, calificación y análisis de los posibles impactos (consecuencias) que podrían ser provocados por obras o actividades que se encuentran en etapa de proyecto o sea que no han sido iniciadas (DGIRA, 2011). Generalmente, el contenido de los estudios de evaluación de impacto ambiental es el siguiente:

- Descripción del proyecto.
- Descripción de las obras y/o actividades.





- Descripción de la problemática y área de influencia del proyecto.
- Identificación y descripción de impactos ambientales.
- Asignación de indicadores de impacto y evaluación.
- Propuestas de medidas para la prevención, mitigación o compensación de impactos ambientales.

En México, los estudios de EIA se presentan ante la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), según sea el caso, mediante tres documentos: informe preventivo, manifestación de impacto ambiental (MIA) modalidad particular y, manifestación ambiental modalidad regional.

El informe preventivo se presenta cuando existen normas u otras disposiciones que regulen, en general, los impactos relevantes que se pudieran generar en las obras de ejecución de un proyecto; por ejemplo las emisiones y descargas de contaminantes. De igual forma cuando se trate de obras que estén previstas en un plan de desarrollo urbano u ordenamiento ecológico ya evaluado por la SEMARNAT y cuando se trate de instalaciones en parques industriales autorizados.

En los casos anteriores la SEMARNAT determinará si se requiere la presentación de una manifestación de impacto ambiental en alguna de las modalidades: regional o particular (DGIRA, 2011).

Una Manifestación de Impacto Ambiental es un documento que contiene el estudio de impacto ambiental para alguna de las obras o actividades previstas en el artículo 28 de la LGEEPA que se deseen realizar.

Además una EIA determina si un proyecto se considerara sujeto de una evaluación de riesgo o si bien exenta de él. Esto significa que, con base en la identificación de impactos potenciales y una vez definida la zona de influencia del proyecto se decidirá si se requiere un análisis más detallado o información adicional para establecer las medidas de prevención y





seguridad apropiadas, según corresponda y en su caso si hay autorización por parte de las instituciones competentes para la ejecución del proyecto.

### 2.13 Riesgo

---

Para hablar de riesgo, es de primordial importancia señalar que la palabra "riesgo" tiene distintas adaptaciones conceptuales en función de la disciplina y el enfoque desde el cuál se le aborde (Asveld & Roeser, 2009; Ramírez, 2009).

En este sentido, se encuentra el riesgo relacionado con la salud humana, el impacto al ambiente, actividades financieras, administración de proyectos, condiciones laborales, ocurrencia de desastres, plantas químicas, acontecimientos políticos y sociales.

A fin de cuentas todos los tipos de riesgo mencionados asocian la posibilidad de ocurrencia de un factor detonante y su potencial de causar daño.

Por lo anterior, la definición más completa establece que, riesgo es la probabilidad de que se desencadene u ocurra un determinado fenómeno o evento que, como consecuencia de su propia naturaleza o intensidad y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, pueda producir pérdidas de bienes o efectos perjudiciales en las personas (DGPCE, 2012) y el ambiente.

Esto significa que el riesgo es función de la naturaleza del peligro, la posibilidad de exposición, las características del receptor, y la posibilidad de ocurrencia de consecuencias (Kolluru, *et al.*, 1998).

El peligro o amenaza se refiere a aquellos agentes físicos, químicos, biológicos, restricciones o condiciones que debido a sus características tienen el potencial de causar daño a personas, bienes o el medio ambiente (CCPS, 1989; Kolluru, *et al.*, 1998; PMI, 2008).





La exposición se refiere a la facilidad de acceso o vías de contacto que existen entre el peligro y el receptor.

El receptor es quien está expuesto al peligro y también es susceptible del impacto de un evento. El o los receptores pueden ser uno o más componentes del ambiente, contenidos en la Figura 9.

La vulnerabilidad es el conjunto de características de los receptores, que los hacen ser susceptibles a la exposición de peligros y a sufrir consecuencias de un evento o fenómeno.

Actualmente al concepto de riesgo se ha añadido un nuevo elemento: la resiliencia, que es la capacidad del receptor expuesto a un peligro para resistir, adaptarse y recuperarse de los efectos de un evento (UNISDR, 2009).

Las consecuencias o impactos son el resultado de la ocurrencia de fenómenos o eventos. Pueden ser buenas y deseables, o malas e indeseables; las cuales, generalmente se asocian con el riesgo.

Las consecuencias de diferentes tipos de riesgos se expresan por lo general en términos de seguridad (por ejemplo: decesos, heridos); salud (por ejemplo: efectos cancerosos y no cancerosos); biodiversidad (extinción de especies, pérdida del hábitat); financieros (como pérdida de bienes, y capital), o una combinación de todos (Kolluru, *et al.*, 1998).

En el caso específico de proyectos, el impacto se ve reflejado en las restricciones básicas contenidas en la Figura 10: alcance (¿Es mejor?), tiempo (¿Es más rápido?), costo (¿Es más barato?) y calidad (¿Qué tan bueno es?).





**Figura 10.** Restricciones básicas de un proyecto. Adaptado de (PMI, 2008)

Con todo lo anterior, el concepto de riesgo nos dice:

- Cuál será el grado de afectación de un evento peligroso. En otras palabras, cuánto de qué, causa cuánto daño a quién.
- Y qué tan seguido se puede esperar que ocurra el evento: cuál es la frecuencia y/o probabilidad.

En términos matemáticos, la ecuación básica para calcular el riesgo está en la Figura 11, la cual establece que el riesgo es el producto de la magnitud de la consecuencia por la frecuencia y/o probabilidad con que ocurre la misma.

$$R = P \times C$$

↓                    ↓                    ↓

Riesgo                    Probabilidad de Ocurrencia                    Consecuencia

**Figura 11.** Expresión básica para calcular el Riesgo.

Los riesgos pueden ser clasificados en varias formas; puede ser en base a las causas de su origen:

- origen antrópico (originados por las actividades humanas)





- origen natural (debido a fenómenos geológicos, hidrometeorológicos, químicos, físicos o biológicos);

También se pueden categorizar conforme a la naturaleza de las consecuencias o de ambas formas. Una de las más completas clasificaciones incluye las categorías siguientes: salud, financiera, ambiental y seguridad (Modarres, 2006).

1. El análisis de riesgo a la salud involucra la estimación de posibles, lesiones enfermedades y pérdidas de vida de humanos, animales y plantas.
2. Análisis de riesgo financiero implica estimar las posibles pérdidas monetarias individuales, institucionales y sociales, tales como las fluctuaciones de divisas, tipos de interés, las pérdidas de los proyectos, pérdidas de mercado, quiebra, y daños a la propiedad.
3. Análisis de riesgos ambientales implica la estimación de las pérdidas debidas a la contaminación en los ecosistemas (agua, tierra y atmósfera), la contaminación por ruido y olores.
4. El análisis de riesgo en la seguridad se divide en dos vertientes. Por una parte involucra la estimación de posibles daños causados por accidentes ocurridos debido a eventos naturales (condiciones climáticas, terremotos, entre otros) o por productos y actividades humanas (tecnologías, accidentes de aviones, plantas químicas, explosiones, obsolescencia tecnológica). Por otra parte, involucra estimar el acceso y daño causado debido a la guerra, terrorismo, crimen, violencia y la apropiación indebida de la información (información de seguridad nacional, propiedad intelectual, etc.).

Hay también interrelación entre las categorías anteriores. Por ejemplo, riesgos ambientales pueden ser conducidos por riesgos financieros.





## 2.14 La evaluación de impacto ambiental

---

Tal y como se establece en la norma de referencia NRF-018-PEMEX-2007, la evaluación de riesgos es el proceso de identificar peligros o condiciones peligrosas en los materiales, sustancias o en los procesos; la Tabla 9 resume las fuentes de peligro en los procesos químicos; analizar y/o modelar las consecuencias en caso de fuga o falla y la frecuencia con que pueden ocurrir, caracterizar y jerarquizar el riesgo resultante (PEMEX, 2008).

En este mismo orden de ideas, de acuerdo al concepto de riesgo y de evaluación de riesgo ambiental contenidos en la LGPGIR, la ERA es el proceso metodológico que permite analizar los factores que pueden originar efectos adversos en la salud de los organismos vivos, en los ecosistemas, o en los bienes debido al manejo, liberación y exposición de materiales o residuos que contengan sustancias químicas con alguna de estas características: corrosiva, reactiva, explosiva, tóxica, inflamable o biológico-infecciosa (CRETIB) (Novelo Burbante, 1995; DOF, 2013).

Además, como se define en la norma de referencia mencionada (NRF-018-PEMEX-2007), es en el estudio de riesgo, donde se integra la información técnica, las premisas y criterios aplicados; la metodología de análisis empleada, las limitaciones del estudio y el catálogo de los escenarios, entre otros datos para la caracterización y evaluación de riesgos.

Por ejemplo, la SEMARNAT establece que un estudio de riesgo debe contener información acerca de:

- I. Escenarios y medidas preventivas resultantes del análisis de los riesgos ambientales relacionados con el proyecto.





- II. Descripción de las zonas de protección en torno a las instalaciones, en su caso, y
- III. Señalamiento de las medidas de seguridad en materia ambiental.

**Tabla 9.** Fuentes de peligro.

Peligros en el proceso	Acontecimientos de inicio
Materiales con características CRETIB: Materiales inflamables Materiales combustibles Materiales inestables Materiales corrosivos Sustancias asfixiantes Materiales altamente reactivos Materiales tóxicos Polvos combustibles Materiales pirofóricos Gases inertes	Alteraciones del proceso *Desviaciones del proceso en: Presión; temperatura; gasto; concentración; cambios de fase/estado; Impurezas; velocidad de reacción/ calor de reacción *Reacción espontánea Polimerización; reacción sin control; explosión interna *Fallas del contenedor Tuberías, tanques recipientes, aparatos/sellos *Fallas en el funcionamiento del equipo Bombas, válvulas, instrumentos, sensores *Pérdida de servicios Eléctricos, agua, refrigeración, aire, fluidos de transferencia de calor, vapor, ventilación
Sensibilidad de la reacción	
Condiciones físicas extremas: Temperaturas altas o criogénicas Altas presiones Vacíos Ciclos de presión Ciclos de temperatura Vibraciones/martilleo Líquido	Fallas en sistemas administrativos Diseño; comunicación
	Error humano Diseño; construcción; operaciones Mantenimiento; pruebas e inspección
	Acontecimientos externos Condiciones climatológicas extremas (inundaciones, vientos); terremotos; Impactos de accidentes en sitios cercanos Vandalismo/sabotaje

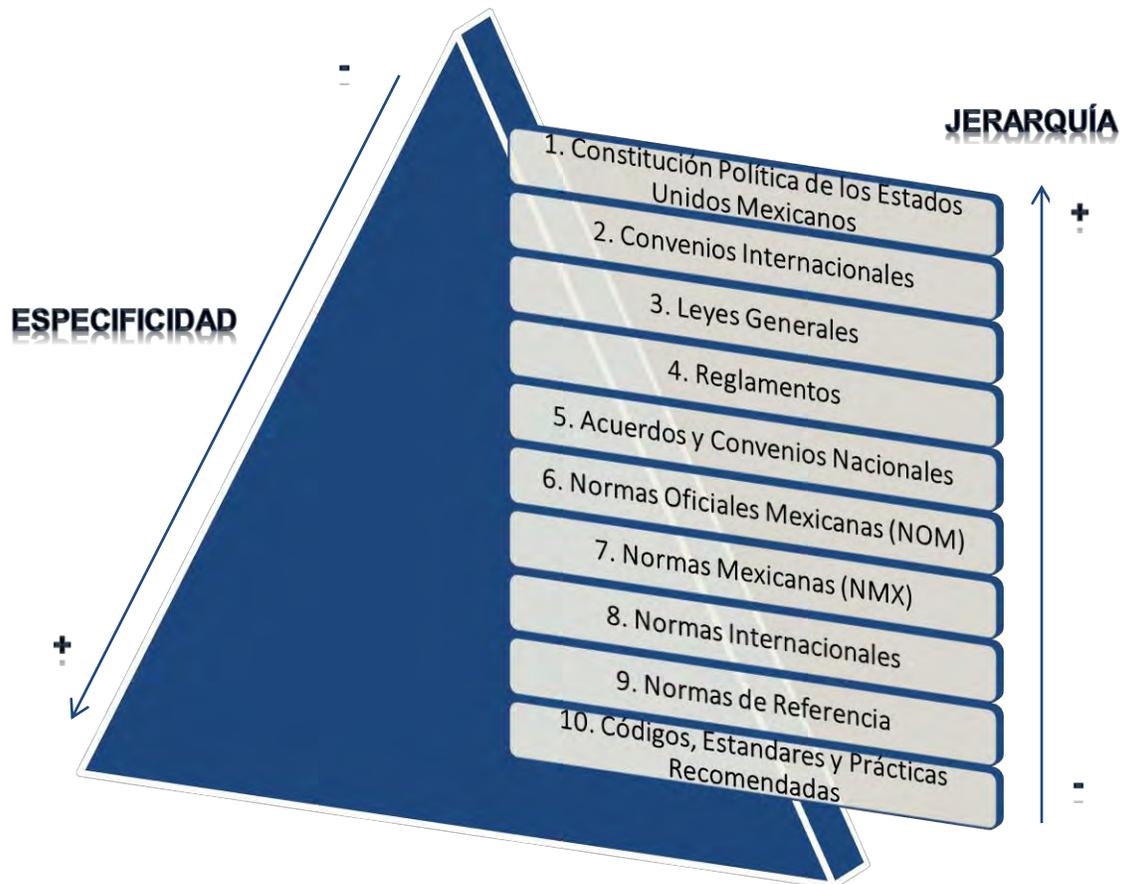
**Fuente:** Adaptado de AIChE/CCPS, 2000



### 3. MARCO LEGAL

El aspecto esencial que se requiere para establecer el marco legal del caso de estudio es el conocimiento de la estructura básica, que se describe en la Figura 12, correspondiente al ordenamiento jurídico en México.

Esta estructura es la guía elegida para establecer y acotar el marco legal relacionado con los temas centrales: EIA, ERA y RSU.



**Figura 12.** Representación de la estructura jurídica en México adaptada en la pirámide Jurídica de Adolf Julius Merkl (1890-1970) y Hans Kelsen (1881-1973)<sup>2</sup>

Los artículos 4, 25, 27, 73 y 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos contenidos en la Figura 13, son la base de los lineamientos para la protección del ambiente en particular, “abordan los

<sup>2</sup> Hans Kelsen y Adolf Julius Merkl fueron los cofundadores de la teoría de la pirámide jurídica. Merkl fue quien desarrollo la configuración de una pirámide jurídica, sin embargo, Kelsen en su obra más destacada: Teoría pura del derecho, “configuró el ordenamiento jurídico en una estructura jerárquica, en la que la norma inferior tiene su razón de validez en la norma superior, hasta alcanzar, en el vértice, la norma fundamental, que da validez y unidad a todo el ordenamiento jurídico” (Domingo, 2009).





temas de protección a la salud, cuidado del medio ambiente, conservación de los recursos naturales, prevención y control de la contaminación, elaboración de reglamentos del servicio de limpia pública y transporte de **los residuos sólidos**” (Vargas Hernández, 2003; Romano Pardo, 2010).



**Figura 13.** Artículos que establecen la base para la regulación ambiental.

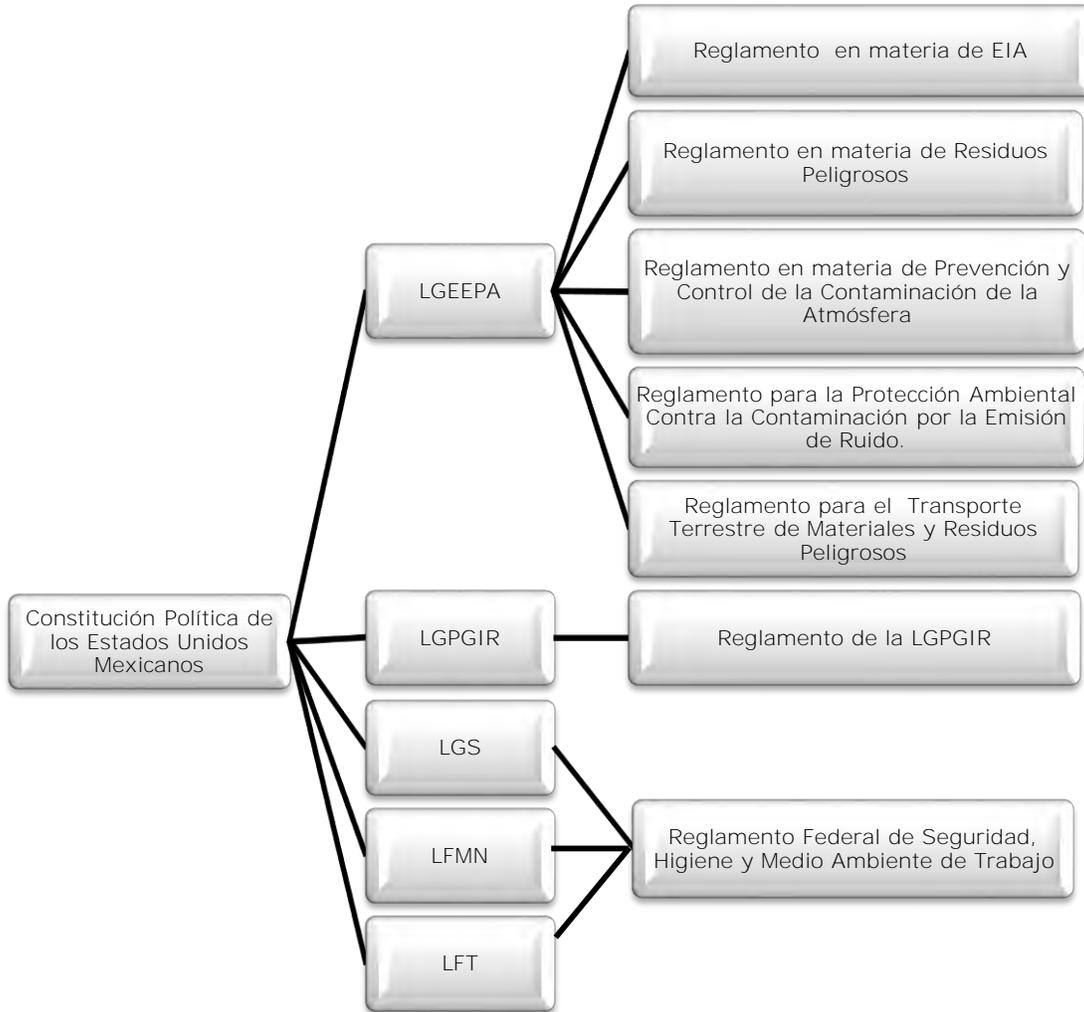
### 3.1 Leyes y reglamentos en materia de EIA y ERA

Después de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, la ley rectora de los temas ambientales es la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA); y al abordar el tema de residuos la ley correspondiente es la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), ambas emitidas por la SEMARNAT, al igual que sus respectivos reglamentos, en el caso de la LGEEPA, el principal reglamento de interés es el que está enfocado a la EIA.

Además es importante consultar el Reglamento Federal de Seguridad, Higiene y Medio Ambiente de Trabajo el cual se deriva de las siguientes leyes: Ley General de Salud (LGS), la Ley Federal sobre Metrología y Normalización (LFMN) y la Ley Federal del Trabajo (LFT).

La Figura 14 presenta un esquema con las principales leyes y sus respectivos reglamentos para consultar al realizar las evaluaciones de riesgo e impacto ambiental de proyectos que pretenden tratar RSOM.





**Figura 14.** Leyes y Reglamentos Federales a consultar para la EIA y ERA de RSOM.

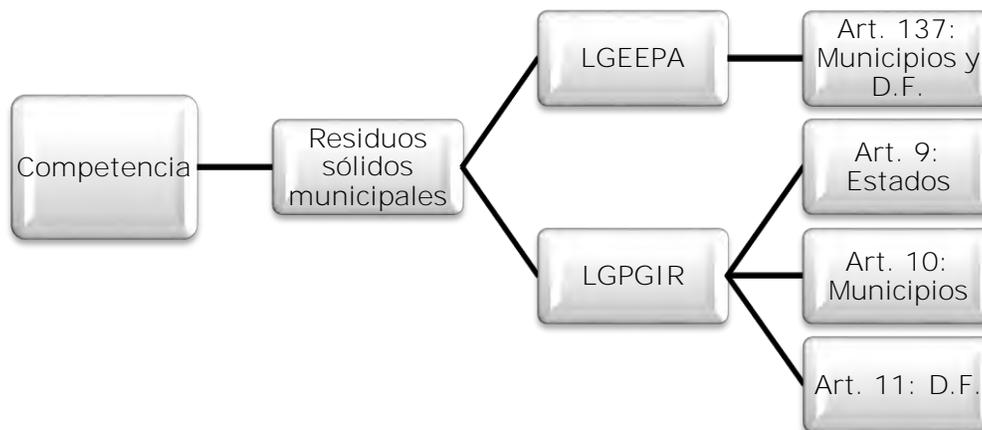
La Figura 15 resume uno de los aspectos importantes que es la distribución de competencias en materia de residuos sólidos municipales.

Por un lado, **la LGEEPA en su artículo 137 establece que “queda sujeto a la autorización de los Municipios o del Distrito Federal, conforme a sus leyes locales en la materia y a las normas oficiales mexicanas que resulten aplicables, el funcionamiento de los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reúso, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales”.**





En la LGPGIR, la distribución de competencias para RSU es establecida en sus artículos 9° para los Estados, 10° para los municipios y 11° para el Distrito Federal.



**Figura 15.** Artículos de la LGEEPA y LGPGIR que establecen la competencia en materia de RSM.

Por lo anterior, es importante consultar las leyes estatales en la materia; por ejemplo, si el proyecto se instala en la jurisdicción del D.F., es importante conocer la Ley Ambiental del Distrito Federal y la Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal con sus respectivos reglamentos, si se instala en el estado de México, la Ley en turno es la Ley de Protección al Ambiente para el Desarrollo Sustentable del Estado De México.

Por otro lado, los artículos 5, 7 y 8 de la LGEEPA establecen la competencia de la federación y los estados en la evaluación de impacto ambiental y de la participación de los municipios en dichas evaluaciones.

La sección V del capítulo IV de la LGEEPA está enfocada al tema de la evaluación de impacto ambiental.

En particular el Artículo 28 de la LGEEPA y el capítulo II del Reglamento en materia de impacto ambiental hablan de las obras o actividades que





requieren autorización en materia de impacto ambiental y de las excepciones.

Mientras que el artículo 30 de la LGEEPA se refiere a las autorizaciones **para realizar dichas obras y señala que “cuando se trate de actividades consideradas altamente riesgosas en los términos de la presente Ley (LGEEPA), la manifestación deberá incluir el estudio de riesgo correspondiente”;** **al respecto el capítulo V del Título Cuarto de la LGEEPA** habla acerca de las actividades consideradas como altamente riesgosas (Artículos: 145, 146, 147, 147 BIS, 148 y 149).

**“En el artículo 35 BIS 1 de la LGEEPA se señala que los informes preventivos, las manifestaciones de impacto ambiental y los estudios de riesgo podrán ser presentados por los interesados, instituciones de investigación, colegios o asociaciones profesionales y que la responsabilidad respecto del contenido del documento corresponderá a quien lo suscriba”** (SEMARNAT, 2011).

También, señala que “las personas que presten servicios de impacto ambiental, serán responsables ante la Secretaría de los informes preventivos, manifestaciones de impacto ambiental y estudios de riesgo que elaboren, quienes declararán bajo protesta de decir verdad que en ellos se incorporan las mejores técnicas y metodologías existentes, así **como la información y medidas de prevención y mitigación más efectivas”** (DOF, 2013).

Dentro de la SEMARNAT la Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental (DGIRA) es la encargada de realizar la evaluación de los informes de riesgo ambiental como parte de la evaluación de impacto ambiental en plantas nuevas (proyectos).

En tanto que la Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas (DGGIMAR) se encarga de los informes de riesgo correspondientes a plantas en operación y de la aprobación de los programas de prevención de accidentes (PPA).





### 3.2 Listados de actividades altamente riesgosas (LAAR)

Es preciso mencionar que en 1990 y 1992 en el Diario Oficial de la Federación se publicaron los acuerdos en los que se describen el primer y segundo listado, respectivamente, de las actividades altamente riesgosas (AAR).

En los listados de actividades altamente riesgosas (LAAR) se considera como AAR aquellas que manejen sustancias peligrosas en cantidades iguales o superiores a la **cantidad de reporte**.

La **cantidad de reporte es la "cantidad mínima de sustancia peligrosa en producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o disposición final, o la suma de éstas, existentes en una instalación o medio de transportes dados, que al ser liberada, por causas naturales o derivadas de la actividad humana ocasionaría una afectación significativa al ambiente, a la población, o a sus bienes"** (DOF, 1990; DOF, 1992).

El primer LAAR corresponde a aquéllas actividades en que se manejan sustancias tóxicas y el segundo LAAR concierne al manejo de sustancias inflamables y explosivas.

En este segundo listado se encuentran dos de las sustancias que se manejarán en la planta piloto de digestión anaerobia: el sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) y el metano ( $CH_4$ ). En la Tabla 10 se presentan las cantidades de reporte correspondientes.

**Tabla 10.** Sustancias inflamables y explosivas involucradas en Actividades Altamente Riesgosas.

Sustancia involucrada	Cantidad de Reporte	Estado
$H_2S$	$\geq 500$ kg	Gaseoso
$CH_4$	$\geq 500$ kg	Gaseoso

**Fuente:** (Segundo LAAR. DOF, 1992).

El segundo LAAR, también establece que una fuga de las mismas, en la producción, procesamiento, transporte, almacenamiento, uso o





disposición final, provocaría la formación de nubes inflamables, cuya concentración sería semejante a la de su límite inferior de inflamabilidad, en un área determinada por una franja de 100 metros de longitud en torno de las instalaciones o medio de transporte. En el caso de formación de nubes explosivas, la presencia de ondas de sobrepresión de 0.5 psi, en esa misma franja (DOF, 1992).

### 3.3 Normas oficiales mexicanas (NOM)

---

La Ley Federal sobre Metrología y normalización establece en su artículo 52 que **“todos los productos, procesos, métodos, instalaciones, servicios o actividades deberán cumplir con las normas oficiales mexicanas”**.

Las normas oficiales mexicanas de observancia obligatoria aplicables a las evaluaciones de impacto y riesgo ambiental abordan los siguientes temas:

- Control de contaminación a la atmósfera, agua y suelo.
- Control de la emisión de ruido, y control de residuos.
- Control de las condiciones de seguridad e higiene en el trabajo.
- Manejo, transporte y almacenamiento de sustancias químicas.
- Conservación de los recursos naturales.
- Ordenamiento ecológico e impacto ambiental.

En la Tabla 11, se muestran las normas oficiales mexicanas, más importantes que se deben consultar para las evaluaciones de impacto y riesgo de una planta de DA para tratar RSOM. Son emitidas por la SEMARNAT, la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS), la Secretaría de Salud (SSA), la Secretaría de Energía (SENER) y la Secretaría de Economía (SE).

En el Anexo 2 se describe el contenido de las normas oficiales mexicanas de la Tabla 11.





**Tabla 11.** Normas oficiales mexicanas aplicables a la EIA y ERA

SEMARNAT	STPS
NOM-001-SEMARNAT-1996 NOM-002-SEMARNAT-1996 NOM-003-SEMARNAT-1997 NOM-004-SEMARNAT-2002 NOM-043-SEMARNAT-1993 NOM-052-SEMARNAT-2005 NOM-081-SEMARNAT-1994 NOM-083-SEMARNAT-2003 NOM-085-SEMARNAT-1994	NOM-002-STPS-2010 NOM-004-STPS-1999 NOM-005-STPS-1998 NOM-010-STPS-1999 NOM-011-STPS-2001 NOM-017-STPS-2008 NOM-018-STPS-2000 NOM-021-STPS-1993 NOM-022-STPS-2008 NOM-026-STPS-2008 NOM-028-STPS-2004 NOM-029-STPS-2011 NOM-030-STPS-2009 NOM-031-STPS-2011
SSA	SENER
NOM-048-SSA1-1993	NOM-001-SEDE-2005 NOM-003-SECRE-2002
SE	
NOM-008-SCFI-2002	

### 3.4 Normas mexicanas, internacionales y de referencia

Las normas mexicanas (NMX) son de aplicación voluntaria y su objetivo principal es establecer una estandarización para determinar la calidad de los productos o servicios.

Al respecto, el art. 55 de la LFMN establece que a falta de NOM o NMX se debe cumplir con las normas internacionales (NI) correspondientes. Sin embargo, cuando las NMX o NI no cubran los requerimientos, o las especificaciones contenidas en éstas se consideren inaplicables u obsoletas, entonces las Normas de Referencia (NRF) serán aplicables, tal y como lo establece el artículo 67 de la LFMN.

Ejemplo de normas de referencia en materia de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, son las emitidas por la secretaría del medio ambiente del Estado de México y se muestran en la Tabla 12.





**Tabla 12.** Normas de referencia emitidas por el Estado de México en materia de residuos sólidos urbanos

Norma técnica estatal ambiental (NTEA):	
▪ NTEA-010-SMA-RS-2008	▪ NTEA-011-SMA-RS-2008
▪ NTEA-013-SMA-RS-2011	▪ NTEA-006-SMA-RS-2006
▪ NTEA-001-SEGEM-AE-2003	

Ejemplos de normas de referencia emitidas por Petróleos Mexicanos, que pueden servir de referencia para las evaluaciones de impacto y riesgo del caso de estudio son las siguientes:

- NRF-010-PEMEX-2004. Espaciamientos mínimos y criterios para la distribución de instalaciones industriales en centros de trabajo de petróleos mexicanos y organismos subsidiarios
- NRF-015-PEMEX-2012. Protección de áreas y tanques de almacenamiento de productos inflamables y combustibles
- NRF-016-PEMEX-2010. Diseño de redes contra incendio (instalaciones terrestres)
- NRF-018-PEMEX-2007. Estudios de riesgo
- NRF-036-PEMEX-2010. Clasificación de áreas peligrosas y selección de equipo eléctrico
- NRF-038-PEMEX-2013. Caminos de accesos a instalaciones industriales
- NRF-140-PEMEX-2011. Sistemas de drenajes

También existe un manual de especificaciones técnicas para el diseño y construcción de biodigestores tipo laguna cubierta y sus sistemas de aprovechamiento energético del biogás producido a partir de los efluentes y excretas de granjas lecheras y porcinas.

Es una publicación conjunta de la SEMARNAT y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) en 2010, (SEMARNAT/SAGARPA, 2010).





Es cierto que este tipo de biodigestores son muy diferentes a los que se usan para el tratamiento de los RSOM, a pesar de esto, es el primer documento oficial en México que contiene regulaciones técnicas, algunas medidas de seguridad y de protección ambiental para plantas de digestión anaerobia.

En cuanto a normatividad internacional la Tabla 13 contiene ejemplos de códigos y estándares relacionados con la seguridad en procesos químicos.

**Tabla 13.** Estándares internacionales relacionados con la seguridad en procesos químicos.

Institución que emite el código o norma	Estándar
RMP 40 CFR 88 Listado de cantidades límite para sustancias químicas	Environmental Protection Agency (EPA)
Código ASME para tuberías	American Society of Mechanical Engineers (ASME)
API 750 Administración de procesos peligrosos	American Petroleum Institute (API)
PSM 29 CFR 1910-119. Administración de la seguridad en los procesos químicos	Occupational Safety and Health Administration (OSHA)
NFPA 30 Código para líquidos inflamables y combustibles NFPA 49 Datos de sustancias químicas peligrosas	National Fire Protection Association (NFPA)
ISO 9001 Sistemas de calidad, modelo para el aseguramiento de calidad en diseño, desarrollo, producción, instalación y servicio. ISO 9003 Modelo para el aseguramiento de la calidad en inspección y pruebas finales	International Organization for Standardization (ISO)
PSM: Process safety management CFR: Code of Federal Regulations RMP: Risk Management Plan	

Para finalizar este capítulo es importante mencionar que en el Anexo 5, se presenta un esquema que es la guía de trámites principales para el desarrollo de proyectos a partir de tecnologías de biogás, biomasa y cogeneración eficiente.





## 4. METODOLOGÍA

---

Para el desarrollo de las evaluaciones de impacto y riesgo ambiental se realizó una investigación documental acerca de las metodologías existentes; las cuales se analizaron y compararon para construir una metodología flexible, adaptada al caso de estudio y que tomará en cuenta el marco legal en materia de EIA y ERA a pesar de que no se realizará un estudio de impacto y/o riesgo tipo guía SEMARNAT en ninguna de sus modalidades.

### 4.1 Principales modelos para la evaluación de impacto ambiental

Hay esencialmente 6 tipos de modelos para la evaluación de impacto ambiental que son: listas de verificación (checklist), el modelo de matriz, el modelo de valor de índice, los modelos descriptivos de análisis de recursos, diagramas de redes y modelos computacionales de simulación (Warner & Preston, 1974; Lapping, 1975; Afifi, 2008)

#### 4.1.1 Listas de verificación (checklist)

Esta metodología presenta una lista específica de los factores ambientales a investigar por sus posibles impactos; no requieren el establecimiento de vínculos de causa-efecto directa entre los componentes ambientales y las actividades del proyecto.

Fomentan la discusión para estructurar la evaluación y ayuda a garantizar que los factores vitales no se descuiden; pueden o no incluir pautas sobre cómo son los parámetros a medir e interpretar (Warner & Preston, 1974; Afifi, 2008).





#### 4.1.2 Modelo de matriz

---

Incorpora una lista de las actividades del proyecto y una lista de verificación de las características ambientales que pudieran ser afectadas. Estas dos listas se relacionan en una matriz que identifica las relaciones causa-efecto entre las actividades y los impactos específicos (Warner & Preston, 1974).

Se asigna un número a cada celda de la matriz para representar la importancia relativa de cada acción con respecto a cada característica del ambiente. **A este "valor de importancia"** se le dará un signo positivo o negativo, dependiendo de si el impacto se valora como beneficioso o perjudicial en cuanto a esa característica (Lapping, 1975).

Las metodologías de matrices pueden especificar qué acciones tienen impacto y cuales características ambientales están involucradas, o simplemente puede enumerar la variedad de posibles acciones y las características en una matriz abierta a ser completada por el analista (Warner & Preston, 1974).

#### 4.1.3 Modelo de valor de índice

---

Generalmente hacen uso de las mismas listas de características ambientales y acciones de desarrollo como las que son utilizadas en los modelos de la matriz. En el modelo de valor de índice, a cada característica ambiental individual se le asigna varios factores de peso, representando los diferentes impactos de las diversas acciones de desarrollo de un proyecto (Lapping, 1975).

Además, hay un componente matemático añadido al proceso, de modo que las distinciones entre las diversas alternativas de acción se pueden demostrar mediante el uso de factores de error. Los impactos no sólo pueden sumarse, como en el modelo de matriz asociada, pueden





multiplicarse. El modelo es capaz de mostrar la interacción de los diferentes impactos, así como su efecto acumulativo sobre las características del entorno (Lapping, 1975).

#### 4.1.4 Modelo descriptivo de análisis de recursos

En esencia, los métodos descriptivos definen y describen un sitio (Lapping, 1975).

Se basan en un conjunto de mapas que representan las características ambientales (físicas, sociales, ecológicas, estéticas) para el área de un proyecto. Los cuales se superponen para producir una caracterización compuesta del medio ambiente regional (Warner & Preston, 1974).

Esto ayuda mucho en el proceso de evaluación de recursos y uso de la tierra porque ilustra fácilmente la base de recursos naturales de cualquier sitio en cuestión. Asimismo, ayuda a verificar que las características ambientales afectadas se encuentren dentro de los límites del proyecto.

#### 4.1.5 Diagramas de redes

Un diagrama de red describe visualmente los vínculos de causa-efecto a partir de una lista de las actividades del proyecto proporcionando una idea de cómo funciona el sistema y representando una guía para la identificación de los efectos de segundo y tercer orden; es decir el impacto indirecto desencadenado por una acción del proyecto (Warner & Preston, 1974; Lapping, 1975).

#### 4.1.6 Modelos computacionales de simulación

La tecnología informática ofrece la posibilidad de ejecutar simulaciones a través de combinaciones de un gran número de variables que están





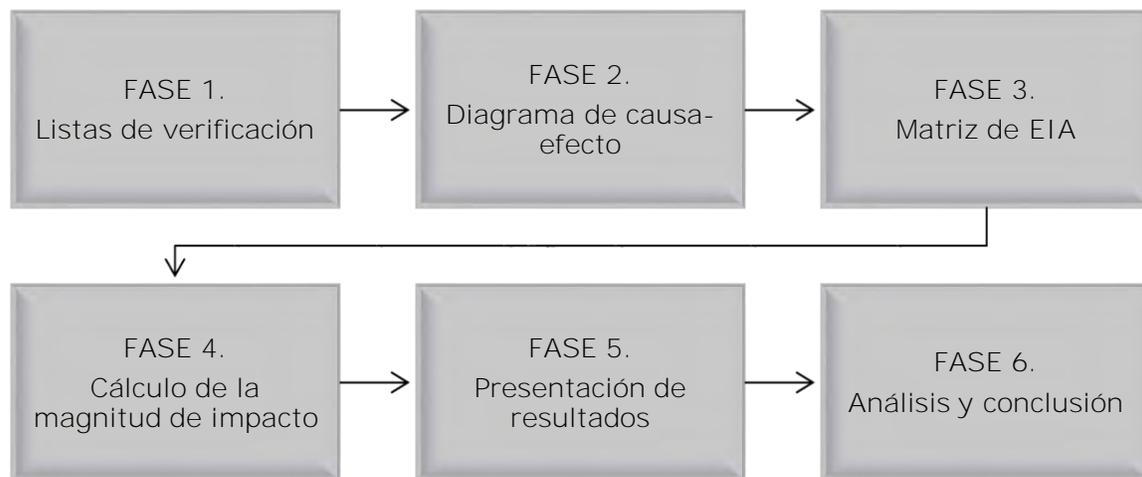
integradas en el sistema, junto con una variedad de acciones posibles y por lo tanto una amplia gama de alternativas de planificación pueden ser evaluadas dentro de un corto período de tiempo. Sin embargo, este tipo de análisis de impacto requiere una base de información amplia y costosa (Lapping, 1975; Afifi, 2008).

#### 4.2 Metodología para la EIA del caso de estudio

Es importante mencionar que, para tener un marco de referencia en la EIA de la digestión anaerobia, como alternativa de tratamiento de RSOM, se realizó la EIA de un relleno sanitario.

También, con el objetivo de aplicar el mismo criterio en la evaluación de los impactos potenciales para los dos métodos de tratamiento de RSOM se consideró una capacidad de tratamiento de 10 t/d, y se tomó en cuenta dos etapas: construcción y operación. Además en el caso del relleno sanitario se consideró que este cumple con los requisitos de la NOM-083-SEMARNAT-2003.

Entonces, para la EIA se decidió combinar los modelos anteriores y la secuencia de la metodología que se construyó para este fin se muestra en la Figura 16.



**Figura 16.** Metodología para la Evaluación de Impacto Ambiental.





#### 4.2.1 Fase 1: Listas de verificación

---

Por medio de listas de verificación, por un lado se identifica cuáles son los factores ambientales susceptibles de impacto y por otro las actividades que lo causan y que se desarrollan en las etapas de construcción y operación.

- Factores susceptibles de impacto

La identificación de los factores susceptibles de impacto y sus elementos, es uno de los puntos más relevantes en las evaluaciones de impacto ambiental. En la Tabla 14 son mostrados los factores con sus respectivos elementos y los atributos afectados de cada uno, que se eligieron para esta evaluación.

Los factores abióticos: aire, agua y suelo. Los factores bióticos, en este caso: flora y fauna. Los factores antrópicos en esta evaluación, se clasificaron en tres grupos: Antrópicos 1, Antrópicos 2 y Antrópicos 3.

Los factores Antrópicos 1: incluyen al paisaje, ruido, y olores; tienen como característica principal que el grado de afectación por cualquier actividad depende de la percepción humana. Por ejemplo, la tolerancia a un determinado olor puede ser diferente para una persona que vive cerca de un basurero que para una persona que vive alejada del basurero.

Los factores Antrópicos 2: incluye la seguridad industrial y la salud ocupacional. La característica principal de este grupo, es que los impactos se verán reflejados al final de cuentas en las instalaciones y en la salud de las personas.

Los factores Antrópicos 3: representan a las actividades socio-económicas de la población; aquí se incluye la generación de empleo y la valorización de subproductos.





**Tabla 14.** Lista de verificación de los factores y sus elementos susceptibles de impacto.

Factor afectado		Elemento	Atributo afectado
Abióticos		Aire	Calidad
		Agua	Calidad Consumo
		Suelo	Características físicas, químicas y biológicas.
Bióticos		Flora y Fauna	Disminución de especies nativas
			Generación de fauna nociva
Antrópicos	Antrópicos 1	Paisaje	Cualidades estéticas
		Ruido	Intensidad
		Olores	Intensidad
	Antrópicos 2	Seguridad industrial	Generación de condiciones seguras
		Salud ocupacional	Afectación a la salud humana
	Antrópicos 3	Socio-económicos	Valorización y aprovechamiento de subproductos.

- Las actividades de los métodos de tratamiento de RSOM que se evalúan se presentan más adelante en las tablas: Tabla 19, Tabla 20, Tabla 21 y Tabla 22.

#### 4.2.2 Fase 2: Diagrama de causa-efecto

Usando la información de las listas de verificación y tomando como guía el esquema representado en la Figura 17, se construye un diagrama de causa-efecto, en donde se describe visualmente el vínculo entre el posible impacto en los factores involucrados y las actividades que se llevan a cabo en cada etapa.





**Figura 17.** Diagrama para la identificación de impactos ambientales.

#### 4.2.3 Fase 3: Matriz de EIA

La matriz de evaluación de impacto ambiental que se construye se basa en las siguientes metodologías:

- Procedimiento para la evaluación de impacto ambiental (Matriz de Leopold):

Esta metodología fue desarrollada en 1971, por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) en respuesta a la Ley de Política Ambiental de ese país, de 1969 (Leopold, *et al.*, 1971) (Ponce, 2011). Es un sistema de matriz que relaciona un gran número de acciones y factores ambientales para la colocación de juicios de valor sobre los impactos que son difíciles de cuantificar. Se publicó con el objetivo de ser utilizada como una guía útil para





los informes de impacto ambiental, y como referencia sistemática de la evaluación de proyectos de desarrollo (Leopold, *et al.*, 1971).

- El Sistema de Evaluación Ambiental de Battelle-Columbus:  
El Sistema de Evaluación Ambiental de Battelle (SEA) es una metodología para análisis del impacto ambiental desarrollado en los laboratorios Battelle Columbus por un equipo de investigación interdisciplinario bajo contrato con el U.S. Bureau of Reclamation (Dee, *et al.*, 1973). La metodología está basada en una evaluación jerárquica de indicadores selectos de calidad ambiental (Ponce, 2011).

Para la elaboración de la Matriz de evaluación de impacto ambiental se utiliza la información de las listas de verificación: las actividades que se desarrollan en las etapas de construcción y operación, los factores susceptibles de impacto, y adicionalmente se definen los criterios de evaluación.

- Criterios de evaluación

En lo que respecta a los criterios de evaluación de impacto, los que se eligieron son: naturaleza, intensidad, alcance y duración.

La calificación de la naturaleza establece si el impacto de cada actividad del proyecto es beneficiosa (signo positivo, "+") o adversa (signo negativo, "-"). En caso de que la actividad no ocasione impactos o éstos sean imperceptibles, entonces el impacto no recibe ninguna calificación.

La intensidad considera que tan grave puede ser la influencia de la actividad del proyecto sobre el componente ambiental analizado:





- Baja (b): Cuando el grado de alteración es pequeño y la condición original de la componente prácticamente se mantiene.
- Media (m): Cuando el grado de alteración implica cambios notorios respecto a su condición original, pero dentro de rangos aceptables.
- Alta (a): cuando el grado de alteración de su condición original es significativo.

El alcance del impacto se presentará de tres formas:

- Puntual (Pu): cuando su efecto se verifica dentro del área en que se localiza la fuente de impacto.
- Local (L): cuando su efecto se verifica fuera del área en que se ubica la fuente del impacto, pero dentro del territorio administrativo del proyecto.
- Extenso (E): Cuando su efecto abarca el territorio que se encuentra fuera de la propiedad del proyecto.

En cuanto a la duración, la calificación puede ser de tres tipos:

- Instantánea (I) cuando el impacto dura un periodo corto;
- Temporal (T) cuando persiste a mediano plazo y
- Permanente (P), cuando la persistencia del impacto es a largo plazo.

Debido a que las diferentes actividades de ambos proyectos generan impactos con diferentes escalas de duración, no se estableció una escala de tiempo específico.

- Calificación cualitativa en la matriz de EIA

Una vez que se tienen definidos los criterios de evaluación, los factores susceptibles de impacto y las actividades por etapa, entonces se procede

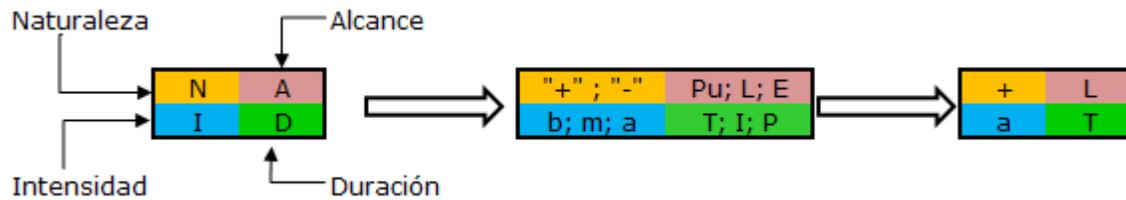




a calificar el posible impacto de determinada actividad (en las filas) sobre los factores (columnas) del entorno en que se desarrolla.

La Figura 18 ejemplifica la forma en que se realizó la calificación en cada casilla de la Matriz de Impacto Ambiental; cada casilla representa el impacto potencial de cada actividad.

En el ejemplo de la Figura 18 la calificación cualitativa nos dice que el impacto es positivo (+), su alcance es local (L), de intensidad alta (a) y de duración temporal (T).



**Figura 18.** Ejemplo de la calificación de cada casilla de la Matriz de Evaluación de Impacto.

Al terminar de calificar para todas las actividades el impacto potencial para cada factor afectado en la Matriz de Evaluación de Impacto, se cuantifican la cantidad de impactos positivos y la cantidad de impactos negativos; por actividad y por factor.

También se realiza la suma de impactos de acuerdo a su intensidad, alcance y duración.

#### 4.2.4 Fase 4: Cálculo de la magnitud de impacto

A simple vista la Matriz de Evaluación de Impacto no nos da mucha información y con las sumas de cada fila y columna los resultados no son muy representativos del impacto de cada actividad del proyecto. Por tal motivo, se realizó una ponderación numérica de los criterios de evaluación





así como de los factores susceptibles de impacto. De igual forma la ponderación fue hecha para las actividades.

La finalidad de estas ponderaciones es la de obtener el valor de la magnitud de impacto ambiental de cada actividad.

Es decir, el valor de la magnitud de impacto nos representará la importancia de la afectación de la actividad sobre cada factor involucrado.

El valor numérico que se asignó a cada criterio de evaluación elegido es presentado en la Tabla 15.

**Tabla 15.** Ponderación numérica a cada criterio de evaluación.

Naturaleza (N)		Intensidad (I)			Alcance (A)			Duración (P)		
+	-	b	M	A	Pu	L	E	I	T	P
1	-1	1	5	10	1	5	10	1	5	10

En esta evaluación se asignó un peso de 3 puntos a los factores abióticos (aire, agua y suelo); la Tabla 16 muestra la ponderación asignada a los factores abióticos susceptibles de impacto.

**Tabla 16.** Ponderación asignada a los factores abióticos, sus elementos y atributos afectados.

Factor afectado	Ponderación	Elemento	Ponderación	Atributo afectado	Ponderación
Abióticos	3.00	Aire	0.33	Calidad	1.00
		Agua	0.33	Calidad	0.55
				Consumo	0.45
		Suelo	0.33	Características físicas, químicas y biológicas.	1.00

A los factores bióticos (flora y fauna) se les asignó una ponderación de 1 punto; la Tabla 17 contiene la ponderación correspondiente a estos factores.





**Tabla 17.** Ponderación asignada a los factores bióticos, sus elementos y atributos afectados.

Factor afectado	Ponderación	Elemento	Ponderación	Atributo afectado	Ponderación
Bióticos	1.00	Flora y fauna	1.00	Disminución de especies nativas	0.55
				Generación de fauna nociva	0.45

A los factores antrópicos se les asignaron los 6 puntos restantes que se distribuyeron de la siguiente forma: Antrópicos 1 (paisaje, ruido y olores) con 3 puntos, Antrópicos 2 (seguridad industrial y salud ocupacional) con 2 puntos, y Antrópicos 3 (socioeconómicos) con 1 punto. La Tabla 18 contiene esta distribución.

**Tabla 18.** Ponderación asignada a los factores antrópicos.

Factor afectado	Ponderación	Elemento	Ponderación	Atributo afectado	Ponderación
Antrópicos 1	3.00	Paisaje	0.20	Cualidades estéticas	1.00
		Ruido	0.40	Intensidad	1.00
		Olores	0.40	Intensidad	1.00
Antrópicos 2	2.00	Seguridad industrial	0.50	Generación de condiciones seguras	1.00
		Salud ocupacional	0.50	Afectación a la salud humana	1.00
Antrópicos 3	1.00	Socio-económicos	1.00	Valorización de subproductos.	1.00

De la misma manera, se realizó la ponderación a las etapas del proyecto; se asignó un peso de 4.5 puntos a la etapa de construcción, mientras que a la etapa de operación se le asignó un peso de 5.5 puntos, por considerarse la más importante.





El peso dado a cada etapa, se distribuyó en cada una de las actividades que se desarrollan en las mismas, de esta forma la suma de la ponderación de cada actividad será el peso que tiene cada etapa.

A continuación, en la Tabla 19, se describen las actividades que se evaluaron correspondientes al desarrollo de la etapa de construcción de la planta de digestión anaerobia, con sus respectivas ponderaciones.

**Tabla 19.** Descripción y ponderación de las actividades en la etapa de construcción de la planta de digestión anaerobia.

No. Actividad	Ponderación	Digestión Anaerobia
E1-A1	0.40	Transporte de material, equipo y personal.
E1-A2	0.50	Rehabilitación, ampliación y construcción de caminos.
E1-A3	0.70	Deforestación de la cobertura vegetal.
E1-A4	0.60	Construcción de cimentaciones.
E1-A5	0.40	Instalación de equipos, tanques, tuberías y accesorios de proceso.
E1-A6	0.40	Red de recolección de efluente (digestato) y agua pluvial.
E1-A7	0.40	Instalación del equipo de tratamiento de biogás y cogeneración de energía.
E1-A8	0.30	Construcción de cerca perimetral y barrera ambiental.
E1-A9	0.40	Construcción infraestructura (Instalación de servicios de agua, electricidad y drenaje).
E1-A10	0.40	Generación de residuos de la construcción (combustibles, aceites, disolventes, pinturas, cascajo o escombros).

Enseguida, en la Tabla 20, se describen las actividades que se evaluaron correspondientes al desarrollo de la etapa de construcción de un relleno sanitario, con sus respectivas ponderaciones.





**Tabla 20.** Descripción y ponderación de las actividades en la etapa de construcción de un relleno sanitario.

No. Actividad	Ponderación	Relleno Sanitario
E1-A1	0.40	Transporte de material, equipo y personal.
E1-A2	0.50	Rehabilitación, ampliación y construcción de caminos.
E1-A3	0.70	Deforestación de la cobertura vegetal.
E1-A4	0.60	Excavación de las celdas de disposición final.
E1-A5	0.40	Impermeabilización de la base del terreno.
E1-A6	0.40	Construcción de drenes de agua pluvial y lixiviado.
E1-A7	0.40	Construcción de estructuras de venteo y quema de biogás.
E1-A8	0.30	Construcción de cerca perimetral y barrera ambiental.
E1-A9	0.40	Construcción infraestructura.
E1-A10	0.40	Generación de residuos de la construcción (combustibles, aceites, disolventes, pinturas, cascajo o escombro).

En la Tabla 21 y la Tabla 22, se describen las actividades de la etapa de operación de la digestión anaerobia y del relleno sanitario, respectivamente, con su ponderación.





**Tabla 21.** Descripción y ponderación de las actividades en la etapa de operación de una planta de digestión anaerobia.

No. actividad	Ponderación	Digestión Anaerobia
E2-A1	0.50	Control de ingreso y pesaje de vehículos que transportan los RSOM.
E2-A2	0.75	Separación de RSOM.
E2-A3	1.15	Tratamiento de RSOM.
E2-A4	0.80	Mantenimiento de equipos.
E2-A5	1.15	Tratamiento del biogás para la generación eléctrica y térmica.
E2-A6	1.15	Tratamiento de digestato.

**Tabla 22.** Descripción y ponderación de las actividades en la etapa de operación de un relleno sanitario.

No. actividad	Ponderación	Relleno Sanitario
E2-A1	0.50	Control de ingreso y pesaje de vehículos que transportan los RSM.
E2-A2	0.75	Recuperación de residuos aprovechables.
E2-A3	1.15	Disposición, compactación y recubrimiento de los RSM en las celdas (uso de maquinaria pesada).
E2-A4	0.80	Mantenimiento de maquinaria.
E2-A5	1.15	Tratamiento pasivo de biogás.
E2-A6	1.15	Tratamiento de lixiviado.

Con el fin de resumir y unificar las actividades de las tablas anteriores correspondientes a las etapas de construcción y la de operación se definió una actividad global que será muy práctica para la presentación y comparación de los resultados de ambos proyectos. En las Tabla 23, se muestran las actividades globales para la etapa de construcción.





**Tabla 23.** Actividades globales para la etapa de construcción.

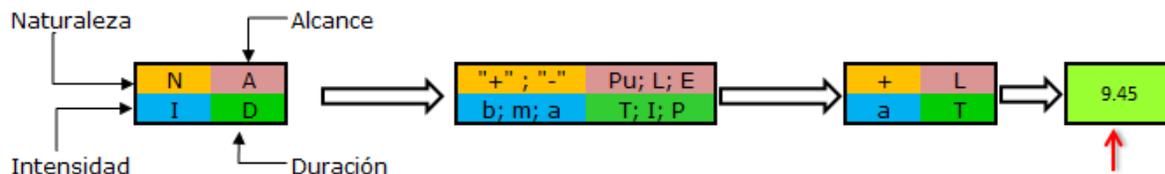
Número de actividad	Actividad global
E1-A1	Transporte de insumos.
E1-A2	Vías de acceso.
E1-A3	Limpieza del sitio.
E1-A4	Cimentación.
E1-A5	Equipamiento.
E1-A6	Red efluentes.
E1-A7	Red biogás.
E1-A8	Cerca perimetral.
E1-A9	Infraestructura.
E1-A10	Residuos.

En la Tabla 24, se muestran las actividades globales para la etapa de operación de ambos proyectos.

**Tabla 24.** Actividades globales para la etapa de operación.

Número de actividad	Actividad global
E2-A1	Recepción RSOM.
E2-A2	Recuperación RSM.
E2-A3	Tratamiento RSOM.
E2-A4	Mantenimiento.
E2-A5	Aprovechamiento Biogás.
E2-A6	Tratamiento de efluentes.

Después de definir la ponderación correspondiente a los criterios de evaluación, factores susceptibles de impacto y actividades, el siguiente paso fue transformar la calificación asignada cualitativamente, como se mostró en la Figura 18, a un valor numérico que nos represente la importancia, magnitud y naturaleza del impacto; esto se muestra en la Figura 19.



**Figura 19.** Magnitud del impacto a partir de la calificación cualitativa.





La magnitud del impacto ambiental se calcula a partir del valor ponderado de cada criterio de evaluación con la Ec. 1:

$$M_i = \pm[(I_i \times W_I) + (A_i \times W_A) + (D_i \times W_P)]$$

Ec. 1.

En donde:

$I_i$  = Intensidad

$A_i$  = Alcance

$P_i$  = Persistencia

$W_{Ii}$  = 0.4; ponderación de la variable intensidad

$W_{Ai}$  = 0.2; ponderación de la variable alcance

$W_{Di}$  = 0.4; ponderación de la variable duración

$\Sigma W_i$  = 1.0

Para completar el cálculo de la magnitud de impacto, la Ec. 1 es multiplicada por los valores ponderados correspondientes al atributo, al elemento, al factor y a la actividad involucrada, como se muestra en la Ec. 2.

$$M_i = \pm[(I_i \times W_I) + (A_i \times W_A) + (D_i \times W_P)](F_{Fi})(F_{Ei})(F_{AFi})(F_{AEi})$$

Ec. 2.

En donde:

$F_{Fi}$  = Valor de la ponderación del factor afectado

$F_{Ei}$  = Valor de la ponderación del elemento afectado

$F_{Ai}$  = Valor de la ponderación del atributo afectado

$F_{AEi}$  = Valor de la ponderación de la actividad a evaluar

$I_i$  = Intensidad

$A_i$  = Alcance

$P_i$  = Persistencia

$W_{Ii}$  = 0.4; ponderación de la variable intensidad

$W_{Ai}$  = 0.2; ponderación de la variable alcance

$W_{Di}$  = 0.4; ponderación de la variable duración

$\Sigma W_i$  = 1.0

Si el valor de la magnitud de impacto es positivo y es un número mayor en comparación con los demás, significa que el impacto es benéfico, y de mayor relevancia. Si para una actividad la magnitud tiene un valor positivo que duplica el valor de una segunda actividad, significa que la primera actividad es más beneficiosa que la segunda.





Por otra parte, si el valor de la magnitud de impacto es negativo y es un número más negativo en comparación con los demás, significa que la actividad genera impactos adversos y que el impacto es muy perjudicial. Mientras más cercana sea la magnitud de impacto a 0 tiende a ser menos adversa y menos significativa.

#### 4.2.5 Fase 5: Presentación de resultados

Se presentan los diagramas de causa-efecto y se elaboran tablas y gráficas que resuman los resultados obtenidos de la matriz y ayuden a visualizar la tendencia de los datos e interpretarlos.

#### 4.2.6 Fase 6: Análisis y conclusiones

Para finalizar con la evaluación se realiza el análisis de las gráficas y los datos de las tablas de resultados obtenidos. Posteriormente se efectúa la formulación de conclusiones derivadas de la evaluación, en donde se presentan propuestas de medidas de prevención y/o mitigación de los impactos adversos.





### 4.3 Principales métodos para la evaluación de riesgo ambiental

En esta sección se presentan los métodos para el análisis de riesgo y se describe la metodología que se implementó para el análisis del caso de estudio.

Las evaluaciones de riesgo ambiental incluyen la identificación de peligros, la estimación y valoración de la magnitud y frecuencia de las consecuencias y la declaración de riesgo resultante.

Para cada una de las fases de la evaluación enunciadas existen diferentes técnicas o métodos. La elección de una u otra técnica depende de la etapa del ciclo de vida del sistema de estudio, si el sistema se encuentra en su etapa de diseño conceptual, planta piloto, ingeniería básica, ingeniería de detalle, procura y construcción, u operación (Texta, 2011).

Comúnmente son análisis cualitativos y cuantitativos que requieren equipos multidisciplinarios, debido a su complejidad. Los métodos más usados pueden clasificarse en forma genérica en comparativos y generalizados. (Santamaría Ramiro & Braña Aísa, 1998)

- Métodos comparativos (cualitativos).  
Utilizan técnicas obtenidas de la experiencia adquirida en equipos e instalaciones similares existentes. Se caracterizan por no recurrir a cálculos numéricos sofisticados.
  - Manuales técnicos, códigos y normas de diseño.
  - Listas de verificación o **"checklist"** (ALC/CHECKLIST).
  - Análisis histórico de accidentes (AHA).
  - Análisis preliminar de riesgos (APR/PHA).
- Métodos generalizados (semi-cualitativos).





- Introducen una valoración cuantitativa respecto a la frecuencia de ocurrencia de un determinado suceso o bien se caracterizan por recurrir a una clasificación de las áreas de una instalación con base a una serie de índices (índices de riesgo) que cuantifican daños.

Existen varios métodos generalizados, los más importantes son:

- Análisis: ¿Qué Pasa Si? (QPS/WHAT IF...?)
- Análisis de árbol de fallos (AAF/FTA).
- Análisis de árbol de sucesos (AAS/ETA).
- Análisis de modo y efecto de los fallos (AMFE/FMEA).
- Análisis funcional de operatividad (AFO/HAZOP).
- Análisis de causas y consecuencias (ACC).

En la legislación mexicana se han definido categorías de riesgo que requieren diferentes modalidades de evaluación; a pesar de que no se realizará un estudio de riesgo tipo guía SEMARNAT en ninguna de sus modalidades, es importante conocer las guías que proporciona esta secretaría para la elaboración de ERA, en caso de que se requiera cumplir ante esta instancia. En la Tabla 25 se describen las características de riesgo asociadas a la categoría o nivel de complejidad (INE-SEMARNAP, 1999). Asimismo en el Anexo 3 se presenta en forma de diagrama de flujo la misma guía, que dictamina el grado del análisis de riesgo en los estudios de riesgo de empresas que realizan actividades altamente riesgosas; aunado a esto en el Anexo 5 se presenta la guía de trámites para el desarrollo de proyectos que involucran tecnologías para biogás y biomasa.





**Tabla 25.** Modalidades de estudios de riesgo aplicables a las actividades altamente riesgosas por su nivel de complejidad.

Nivel de complejidad	Descripción de las características de riesgo de cada nivel	Modalidad de estudio de riesgo solicitado
I	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Se realizan operaciones de mezclado, filtración o almacenamiento, o la combinación de ellas.</li><li>▪ El almacenamiento ocurre a condiciones atmosféricas.</li><li>▪ No se realizan reacciones químicas en las áreas de producción, intercambio de calor, manejo de presiones diferentes a la atmosférica y temperaturas mayores a la del ambiente.</li><li>▪ El uso de suelo es industrial, rural o agrícola</li></ul>	Análisis Preliminar de Riesgo
II	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ Se trata de complejos químicos o petroquímicos con dos o más plantas.</li><li>▪ Se produce uno de los siguientes materiales: ácido fluorhídrico, ácido clorhídrico, óxido de etileno, butadieno, cloruro de vinilo o propileno.</li><li>▪ El establecimiento ha sufrido accidentes mayores.</li><li>▪ Cuando se trata de una actividad que está interconectada con otra AAR ubicada en predio colindante, a través de tuberías en las que se maneje alguno de los materiales reportados en los LAAR.</li></ul>	Análisis de Riesgo
III	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ El tipo de operación que se realiza es destilación, refrigeración, extracción con disolventes o absorción.</li><li>▪ El almacenamiento es en tanques presurizados.</li><li>▪ Existe reacción química, intercambio de calor y/o energía, presiones mayores o menores a la atmosférica o temperaturas mayores a la del ambiente.</li><li>▪ El uso de suelo es habitacional, mixto o es zona de reserva ecológica.</li><li>▪ La zona es susceptible a sismos, hundimientos o fenómenos hidrológicos y meteorológicos.</li></ul>	Análisis Detallado de Riesgo.

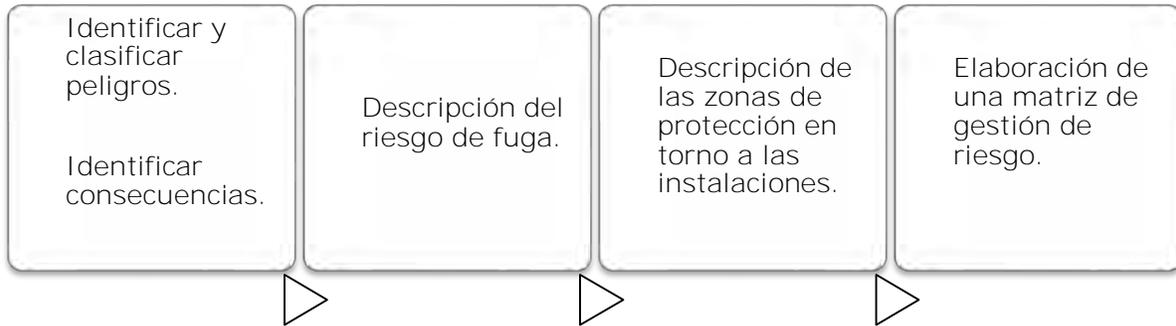
**Fuente:** Adaptado de (INE-SEMARNAP, 1999)





#### 4.4 Metodología para la evaluación de riesgo del caso de estudio

Después de reunir y analizar información acerca de las metodologías para la evaluación de riesgo, la estructuración de la metodología será la siguiente; mostrada en la Figura 20:



**Figura 20.** Metodología para la Evaluación de Riesgo del caso de estudio.

En general en la primera fase, se realiza la identificación de peligros agrupándolos en:

- o Peligros asociados a materiales y sustancias químicas manejadas en la planta de digestión anaerobia,
- o Peligros asociados a las condiciones de operación (prácticas laborales).

La segunda fase del análisis contiene la descripción del riesgo de fuga: causas y consecuencias.

La tercera fase, consiste en la descripción de las zonas de seguridad en una planta de digestión anaerobia.

La cuarta y última fase del análisis es la elaboración de una matriz de gestión del riesgo, que está basada en una matriz descrita por la *Environmental Protection Agency* (EPA, 2009) y fue adaptada al caso de estudio. La matriz de gestión del riesgo está dividida en tres secciones: datos e información, juicio y respuesta al riesgo.





En la sección de datos e información se analiza la fuente de riesgo, el daño, los receptores y las vías de exposición.

- La fuente de peligro será la actividad o la operación que tiene lugar para que un peligro particular pueda surgir. Se identificará respondiendo la pregunta: ¿Cuál es el agente o proceso con potencial de causar daño?
- El daño puede surgir cuando un peligro específico se realiza. La pregunta guía es: ¿Cuáles son las consecuencias perjudiciales si las cosas van mal?
- Los receptores a considerar deben incluir: la atmósfera, el suelo, las aguas superficiales, las aguas subterráneas, los seres humanos, los animales domésticos, la vida silvestre y sus hábitats. Un solo receptor puede estar en riesgo de varias fuentes diferentes y todos deben ser tratados. Para identificar a los receptores las preguntas guía son: ¿Qué es lo que está en riesgo? ¿Qué es lo que se quiere proteger? ¿Quién puede verse más afectado por el riesgo? (NAS, 1983)
- Las vías de exposición son las rutas o medios por los cuales los riesgos definidos potencialmente pueden realizar sus consecuencias en los receptores. Para conocer cuál es la vía de exposición la pregunta guía es: ¿Cómo puede el receptor entrar en contacto con la fuente?

La sección de Juicio está compuesta por:

- Probabilidad de exposición: es la probabilidad de que los receptores están expuestos al peligro. La pregunta guía es: ¿Qué tan probable es este contacto? Las probabilidad en términos cualitativos se define como sigue:





- Alto: la exposición es probable, directa sin barreras o pocas barreras entre la fuente y el receptor del peligro.
  - Medio: la exposición es bastante probable, las barreras frente a la exposición son menos controlables.
  - Baja: La exposición es poco probable, existen varias barreras frente a los riesgos entre la fuente y los receptores. prácticamente hay barreras para mitigar la exposición.
- Consecuencia.  
Las consecuencias de la ocurrencia de un riesgo pueden ser daños reales o potenciales. Esto incluye estar en una puntuación: alta, media, baja, utilizando los atributos y la escala para considerar el "daño". La pregunta guía es ¿Qué tan grave serán las consecuencias si esto ocurre?
  - Magnitud de riesgo  
Se determina mediante la combinación de la probabilidad con la magnitud de las consecuencias potenciales. La pregunta guía es: ¿Cuál es la magnitud global del riesgo?
    - Los riesgos altos requieren una evaluación adicional y la gestión activa.
    - Los riesgos medios requieren de una evaluación adicional y pueden requerir una gestión activa o monitoreo.
    - Riesgos bajos y muy bajos requieren una revisión periódica.
  - Justificación de la magnitud  
Se explica por qué se asignó tal magnitud al riesgo en cuestión. La pregunta guía es: ¿En qué se basa el juicio de la calificación?





La Tabla 26 proporciona un método simple para estimar los niveles de riesgo a través de la probabilidad estimada y la consecuencia esperada.

**Tabla 26.** Niveles de Riesgo.

Variable	Consecuencia			
	Escala:	Ligeramente Dañina	Dañina	Extremadamente Dañina
Probabilidad	Baja	Riesgo trivial: 1	Riesgo Tolerable: 2	Riesgo Moderado: 3
	Media	Riesgo Tolerable: 2	Riesgo Moderado: 4	Riesgo Importante: 6
	Alta	Riesgo Moderado: 3	Riesgo Importante: 6	Riesgo Intolerable: 9

Sección de respuesta al riesgo

Acciones propuestas.

Aquí se propone la implementación de acciones para la eliminación o limitación de la articulación fuente-vía-receptor y así reducir el riesgo. La pregunta guía es: ¿Cómo se puede manejar mejor el riesgo para reducir la magnitud?

Riesgo residual

Después de ejecutar la respuesta recomendada siempre existe el riesgo pero con una magnitud diferente que se conoce como riesgo residual. La pregunta guía es: ¿Cuál es la magnitud del riesgo después de la gestión?





## 5. DESARROLLO DE LAS EVALUACIONES Y RESULTADOS

---

En este capítulo se desarrollan las evaluaciones de impacto y riesgo del caso de estudio, aplicando la metodología descrita en el capítulo anterior. Incluye los resultados obtenidos y el análisis de los mismos.

### 5.1 Evaluación de impacto ambiental

---

La primera evaluación que se desarrolló es la EIA, que incluye su identificación, el análisis mediante la matriz de evaluación (en donde se compara el impacto de una planta de digestión anaerobia con un relleno sanitario) y la propuesta de medidas de prevención de los impactos más significativos.

#### 5.1.1 Diagramas de causa-efecto

---

El fin de los diagramas de causa efecto es relacionar las actividades que se desarrollan en la construcción y operación de un método de tratamiento de RSOM, en este caso una planta de digestión anaerobia y un relleno sanitario, con sus posibles afectaciones.

Esto es, identificar la ruta de origen de la causa de aquellos impactos que afectan a los factores ambientales involucrados (abióticos, bióticos y antrópicos). Los diagramas se construyeron como se estableció en la metodología ya descrita.

El diagrama de la Figura 21 relaciona las afectaciones al aire, suelo y agua con la actividad que provoca el impacto y la etapa del proyecto en la que se da el efecto.

Por ejemplo, la alteración de la calidad del aire se debe a la emisión de gases y partículas por el uso de maquinaria para las obras de excavación, en la etapa de construcción.





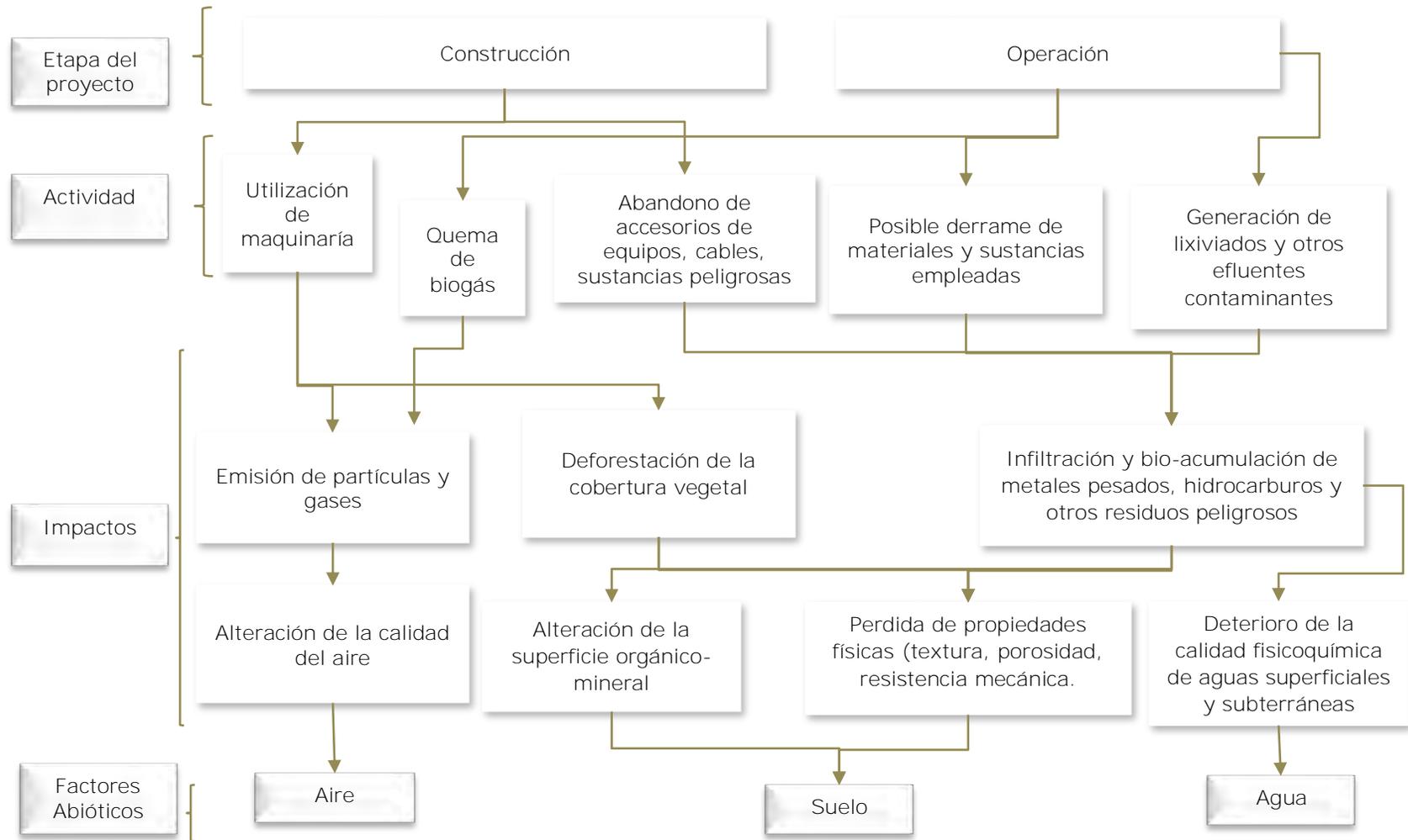
Mientras que el diagrama de la Figura 22 relaciona las afectaciones a la flora y fauna con las actividades del proyecto.

Un ejemplo de este diagrama, es la alteración de micro ecosistemas debido a la deforestación de la cobertura vegetal en la etapa de construcción. Y también por la bio-acumulación de sustancias contaminantes que se pueden llegar a derramar en la etapa de operación.

Por último el diagrama de la Figura 23 relaciona las afectaciones del proyecto a los factores antrópicos de percepción.

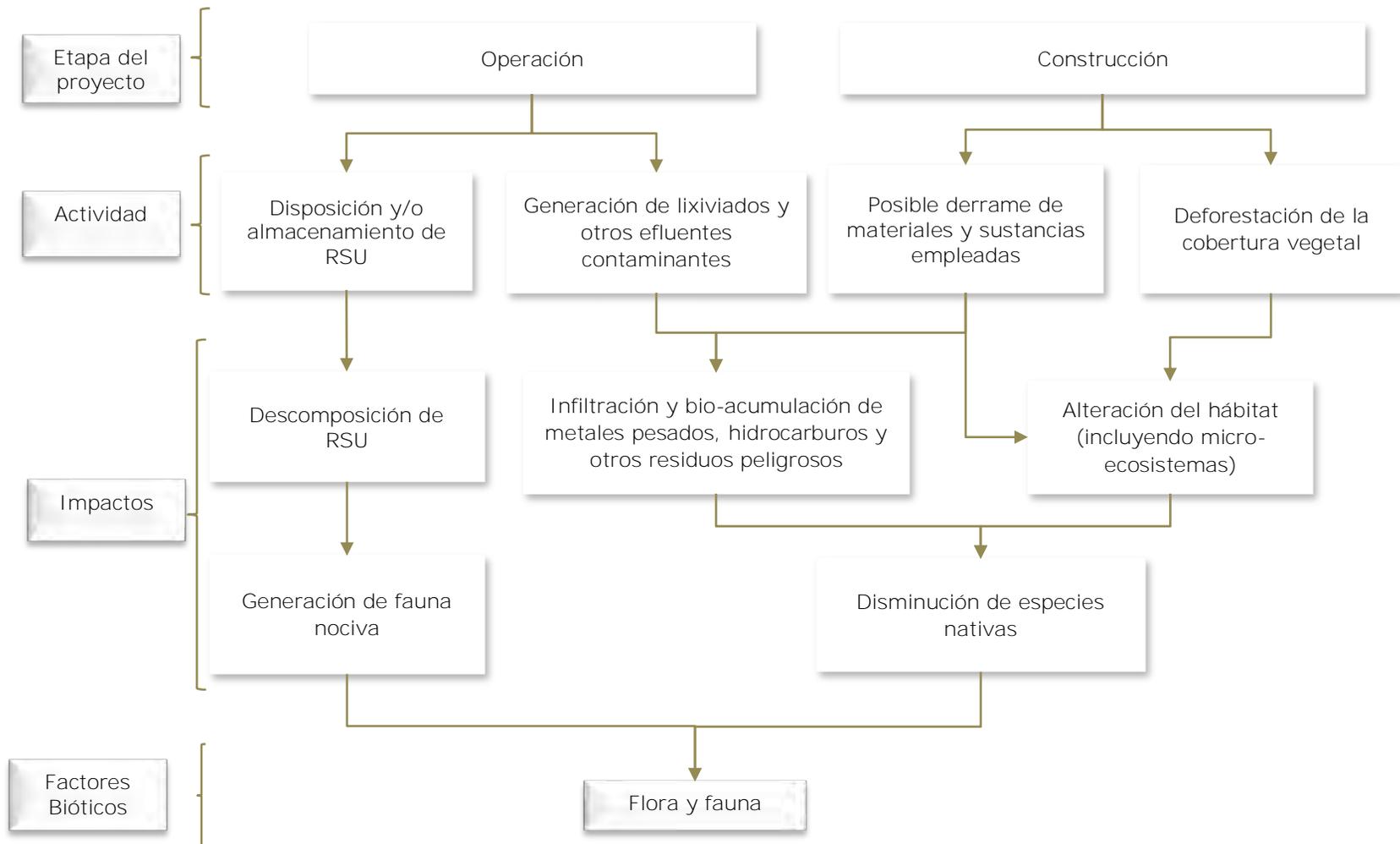
Aquí el impacto es hacia la población que este expuesta a las emisiones de ruido causadas por el uso de maquinaria o equipos tanto en la construcción como en la operación. Las emisiones de olores y modificación del paisaje.





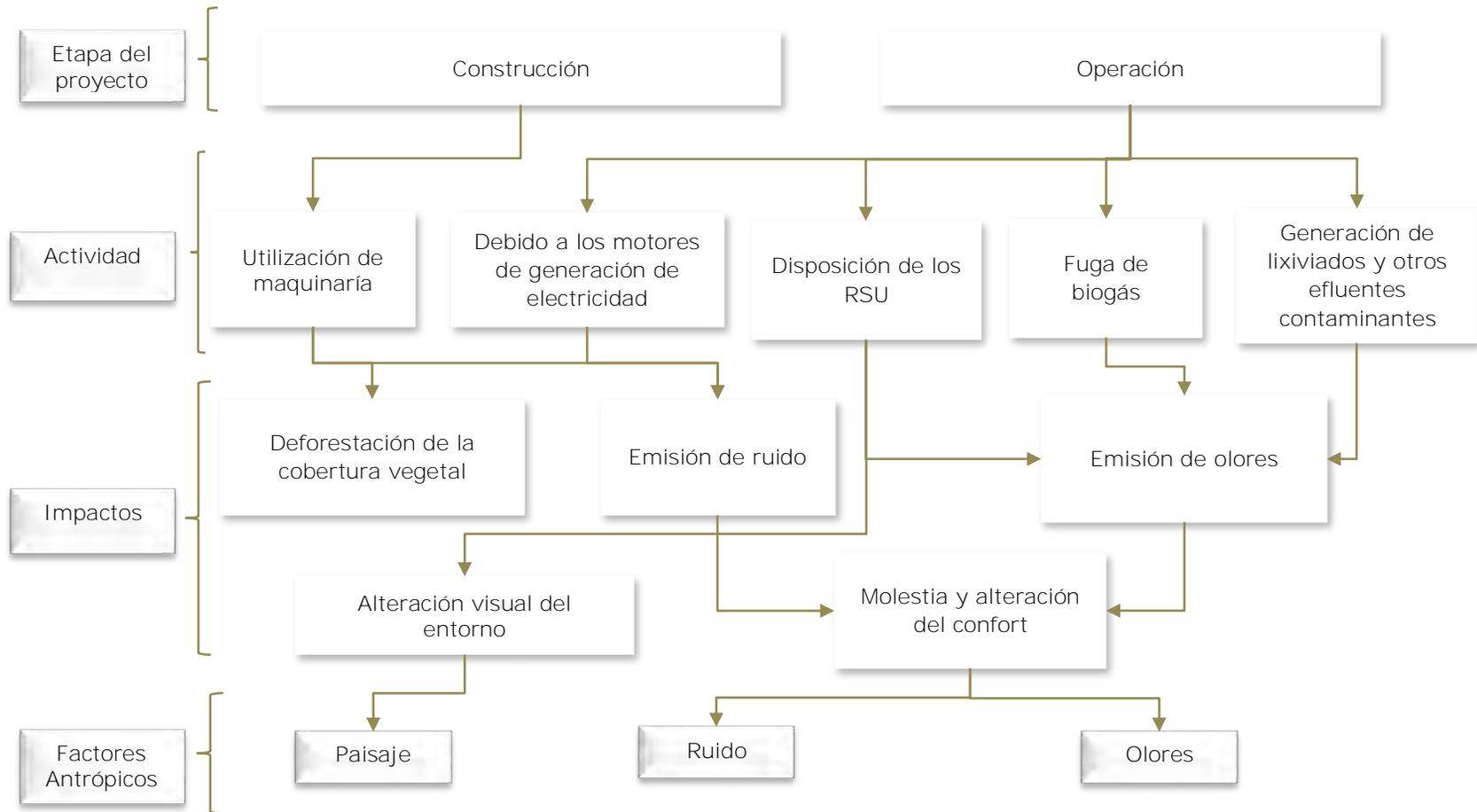
**Figura 21.** Diagrama de identificación de impactos factores abióticos





**Figura 22.** Diagrama de Identificación de Impactos (Factores Bióticos).





**Figura 23.** Diagrama de identificación de impactos (Factores Antrópicos de percepción).





### 5.1.2 Matriz de evaluación de impacto

Después de definir en los diagramas causa-efecto la relación de las actividades con su posible impacto, en la Matriz de Evaluación de Impacto se calificó la naturaleza, intensidad, alcance y duración del impacto que se origina en cada una de las actividades. En total se calificó el impacto de 16 actividades (filas) en 12 atributos afectados (columnas) es decir una matriz de 192 casillas, cada una representando un posible impacto. En la Tabla 27 se muestra el total de impactos obtenidos para las tecnologías evaluadas.

**Tabla 27.** Número total de impactos obtenidos en la evaluación de la digestión anaerobia y del relleno sanitario.

Tecnología:	Digestión Anaerobia	Relleno Sanitario
Total de impactos	77	80

En las Figura 24, Figura 25, Figura 26 y Figura 27 se presenta la Matriz de Evaluación de Impacto correspondiente a la digestión anaerobia, dividida en cuatro secciones.

En primera instancia los primeros resultados que se obtuvieron con la Matriz de Impacto son mostrados en la Tabla 28, la cual describe el tipo y el número de impacto de cada tecnología. Los resultados de la Tabla 28, muestran que la planta de digestión anaerobia tiene la menor cantidad de impactos negativos (52) que el relleno sanitario (65); y mayor cantidad de impactos positivos: 25.

En un análisis rápido de la Tabla 28, se observa que la mayor cantidad de impactos de la planta de digestión anaerobia son de intensidad baja (43), puntuales (en el sitio de instalación): 65; y la duración de la mayoría de los impactos es instantánea (31 impactos) y temporal (29 impactos).





**Tabla 28.** Total de impactos de la digestión anaerobia y del relleno sanitario obtenidos de la evaluación de impacto ambiental.

Tipo de impacto		Digestión Anaerobia	Relleno Sanitario
Naturaleza	Positivos	<b>25</b>	15
	Negativos	52	<b>65</b>
Intensidad	Baja	43	29
	Media	27	36
	Alta	7	<b>15</b>
Alcance	puntual	65	64
	Local	10	12
	Extenso	<b>2</b>	<b>4</b>
Duración	Instantáneo	31	33
	Temporal	29	27
	Permanente	17	<b>20</b>

En contraste, aplicando el mismo análisis al relleno sanitario, encontramos que la mayoría son negativos, su intensidad es en general media, su alcance es puntual, su duración es instantánea y temporal.

Sin embargo, al ver detalladamente los datos, se observa que, de las dos tecnologías, el relleno sanitario tiene el mayor número de impactos de intensidad alta, de alcance extenso y el mayor número de impactos con duración a largo plazo (extensos).

De este análisis se concluye que la planta de digestión anaerobia contiene el menor número de impactos negativos con respecto al relleno sanitario; y que las características de los impactos de la planta de DA no afectarán de forma significativa los factores ambientales evaluados en comparación del relleno sanitario que si los afecta de forma significativa.





**Figura 24.** Matriz de Evaluación de Impacto para la Digestión Anaerobia (Parte 1: etapa de construcción; Factores abióticos y Bióticos).

Etapa	No.	Actividades:	Tipo de Factor:	Abiótico				Biótico			
			Ponderación:	3.00				1.00			
			Elementos:	Aire	Agua		Suelo	Flora y fauna			
			Ponderación:	0.33	0.33		0.33	1.00			
			Atributo afectado:	Calidad	Calidad	Consumo	Características físicas, químicas y biológicas.	Disminución de especies nativas	Generación de fauna nociva		
			Ponderación:	1.00	0.55	0.45	1.00	0.55	0.45		
Construcción	E1-A1	Transporte de material, equipo y personal.	0.40	- b	Pu T						
	E1-A2	Rehabilitación, ampliación y construcción de caminos.	0.50	- b	Pu T			- m	Pu P		
	E1-A3	Deforestación de la cobertura vegetal.	0.70	- b	Pu T			- b	Pu P		
	E1-A4	Construcción de cimentaciones.	0.60			- b	Pu I	- b	Pu P		
	E1-A5	Instalación de equipos, tanques, tuberías y accesorios de proceso.	0.40			- b	Pu I	- b	Pu P		
	E1-A6	Red de colección de efluente (digestato) Y agua pluvial.	0.40			+ m	Pu P	- b	Pu P		
	E1-A7	Instalación del equipo de tratamiento de biogás y cogeneración de energía.	0.40	+ a	E P			- b	Pu P		
	E1-A8	Construcción de cerca perimetral y barrera ambiental	0.30			- b	Pu I			+ m	Pu I
	E1-A9	Construcción infraestructura (Instalación de servicios de agua, electricidad, drenaje)	0.40			- m	Pu I	- m	Pu P		
	E1-A10	Generación de residuos de la construcción.	0.40			- a	Pu T	- m	Pu T		





**Figura 25.** Matriz de Evaluación de Impacto para la Digestión Anaerobia (Parte 2: etapa de construcción; Factores antrópicos).

Etapa	No.	Actividades:	Tipo de Factor:	Antrópico 1			Antrópico 2		Antrópico 3
			Ponderación:	3.00			2.00		1.00
			Elementos:	Paisaje	Ruido	Olores	Seguridad Industrial	Salud ocupacional	Socioeconómicos
			Ponderación:	0.20	0.40	0.40	0.50	0.50	1.00
			Atributo afectado:	Cualidades estéticas.	Intensidad	Intensidad	Generación condiciones seguras	Afectación a la salud humana	Valorización y aprovechamiento de subproductos
			Ponderación:	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Construcción	E1-A1	Transporte de material, equipo y personal.	0.40		- L m I		- Pu b I		
	E1-A2	Rehabilitación, ampliación y construcción de caminos.	0.50	- Pu m P	- L m I				
	E1-A3	Deforestación de la cobertura vegetal.	0.70	- Pu b P	- Pu b I				
	E1-A4	Construcción de cimentaciones.	0.60		- Pu b I		+ Pu m P		
	E1-A5	Instalación de equipos, tanques, tuberías y accesorios de proceso.	0.40	- Pu b P	- Pu b I		- Pu m T	- Pu b I	
	E1-A6	Red de colección de efluente (digestato) Y agua pluvial.	0.40	- Pu b P	- Pu b I				
	E1-A7	Instalación del equipo de tratamiento de biogás y cogeneración de energía.	0.40	- Pu b T	- Pu b I	+ L m T	+ Pu m T	- Pu b I	
	E1-A8	Construcción de cerca perimetral y barrera ambiental	0.30	+ Pu a P			+ Pu m T	+ Pu b T	
	E1-A9	Construcción infraestructura (Instalación de servicios de agua, electricidad, drenaje)	0.40	- Pu b T			+ Pu m T	+ Pu m T	
	E1-A10	Generación de residuos de la construcción.	0.40	- Pu b I					





**Figura 26.** Matriz de Evaluación de Impacto para la Digestión Anaerobia (Parte 3: etapa de operación; Factores abióticos y Bióticos).

Etapa	No.	Actividades:	Tipo de Factor:	Abiótico				Biótico			
			Ponderación:	3.00				1.00			
			Elementos:	Aire	Agua		Suelo	Flora y fauna			
			Ponderación:	0.33	0.33		0.33	1.00			
			Atributo afectado:	Calidad	Calidad	Consumo	Características físicas, químicas y biológicas.	Disminución de especies nativas	Generación de fauna nociva		
			Ponderación:	1.00	0.55	0.45	1.00	0.55	0.45		
Operación	E2-A1	Control de ingreso y pesaje de vehículos que transportan los RSOM.	0.50	- b	Pu I			- b	Pu I		
	E2-A2	Separación de RSOM en la fuente.	0.75								
	E2-A3	Tratamiento de RSOM	1.15	+ m	Pu T			- m	Pu T		
	E2-A4	Mantenimiento de equipos	0.80	+ b	Pu T			- b	Pu I	- b	Pu I
	E2-A5	Tratamiento del biogás para la generación eléctrica y térmica.	1.15	+ a	E T						
	E2-A6	Tratamiento de digestato.	1.15			+ m	Pu T			+ m	Pu T





**Figura 27.** Matriz de Evaluación de Impacto para la Digestión Anaerobia (Parte 4: etapa de operación; Factores antrópicos).

Etapa	No.	Actividades:	Tipo de Factor:	Antrópico 1			Antrópico 2		Antrópico 3
			Ponderación:	3.00			2.00		1.00
			Elementos:	Paisaje	Ruido	Olores	Seguridad Industrial	Salud ocupacional	Socioeconómicos
			Ponderación:	0.20	0.40	0.40	0.50	0.50	1.00
			Atributo afectado:	Cualidades estéticas.	Intensidad	Intensidad	Generación condiciones seguras	Afectación a la salud humana	Valorización y aprovechamiento de subproductos
			Ponderación:	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Operación	E2-A1	Control de ingreso y pesaje de vehículos que transportan los RSOM.	0.50		- L m l	- Pu b l		- Pu b l	
	E2-A2	Separación de RSOM en la fuente.	0.75				+ Pu m l		+ L b l
	E2-A3	Tratamiento de RSOM	1.15		- Pu m T	+ Pu m T	- Pu b l	- Pu b l	
	E2-A4	Mantenimiento de equipos	0.80		- Pu b l		+ Pu b T		
	E2-A5	Tratamiento del biogás para la generación eléctrica y térmica.	1.15		- Pu m l	+ L a T	- L m T		+ L a T
	E2-A6	Tratamiento de digestato.	1.15			+ L m T	+ Pu b T		+ L a T





El siguiente análisis está enfocado a la magnitud de impacto global, que se generó de la conversión de una calificación cualitativa a un valor numérico.

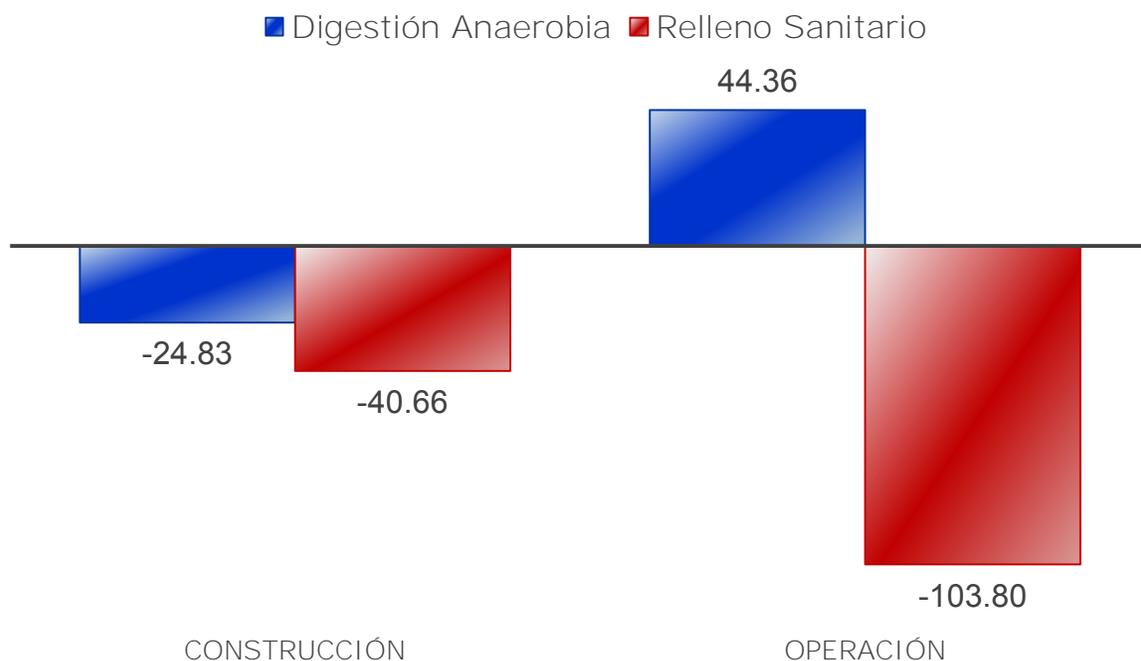
Los resultados obtenidos de la magnitud de impacto para cada etapa de ambas tecnologías se presentan en la Tabla 29, en dónde el impacto global del relleno sanitario es 144 veces más adverso.

**Tabla 29.** Magnitud de impacto global de la planta de digestión anaerobia y del relleno sanitario en cada etapa.

Etapa	Digestión Anaerobia	Relleno Sanitario
Construcción	-24.83	-40.66
Operación	44.36	-103.80
Magnitud de Impacto Total	<b>19.54</b>	<b>-144.45</b>

Además en la Gráfica 1, la diferencia es más notoria a favor de la digestión anaerobia, pues el impacto negativo de mayor magnitud es para el relleno sanitario.

**Gráfica 1.** Magnitud de Impacto de la digestión anaerobia vs el relleno sanitario en las etapas de construcción y operación.





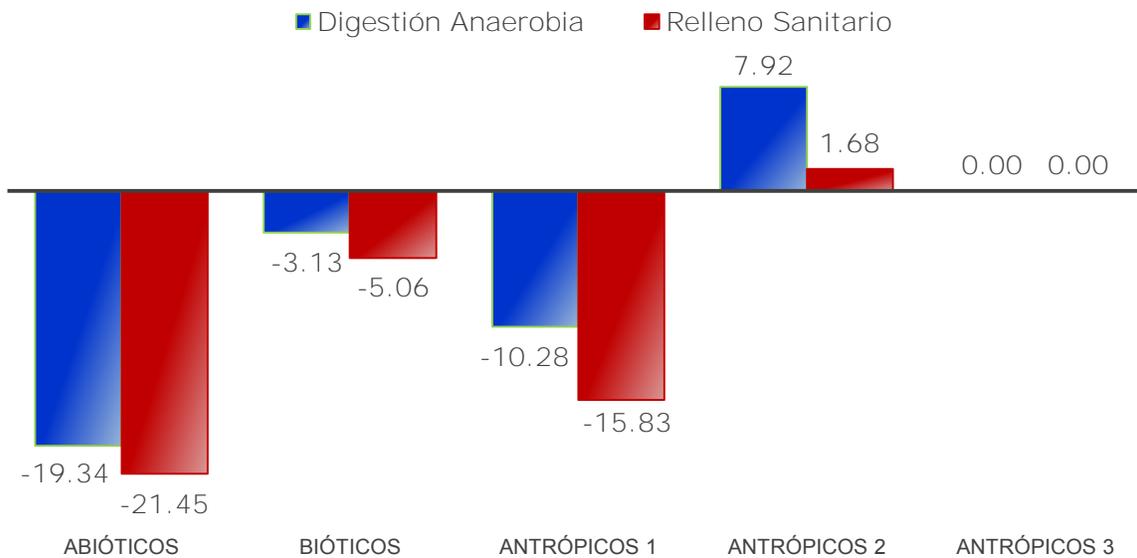
La Tabla 30 muestra el impacto global de la etapa de preparación del sitio y construcción sobre los factores abióticos, bióticos y antrópicos para la digestión anaerobia y el relleno sanitario.

**Tabla 30.** Magnitud del impacto de cada tecnología en los factores abióticos, bióticos y antrópicos en la etapa de construcción.

Tipo de Factores	Digestión Anaerobia	Relleno Sanitario
Abióticos	-19.34	-21.45
Bióticos	-3.13	-5.06
Antrópicos 1	-10.28	-15.83
Antrópicos 2	7.92	1.68
Antrópicos 3	0.00	0.00
Magnitud de Impacto Total	<b>-24.83</b>	<b>-40.66</b>

Estos resultados son presentados también en la Gráfica 2, en la cual se observa que la digestión anaerobia tiene la menor magnitud de impacto en los factores involucrados en comparación del relleno sanitario.

**Gráfica 2.** Magnitud de Impacto de la etapa de construcción de la planta de digestión anaerobia vs relleno sanitario.





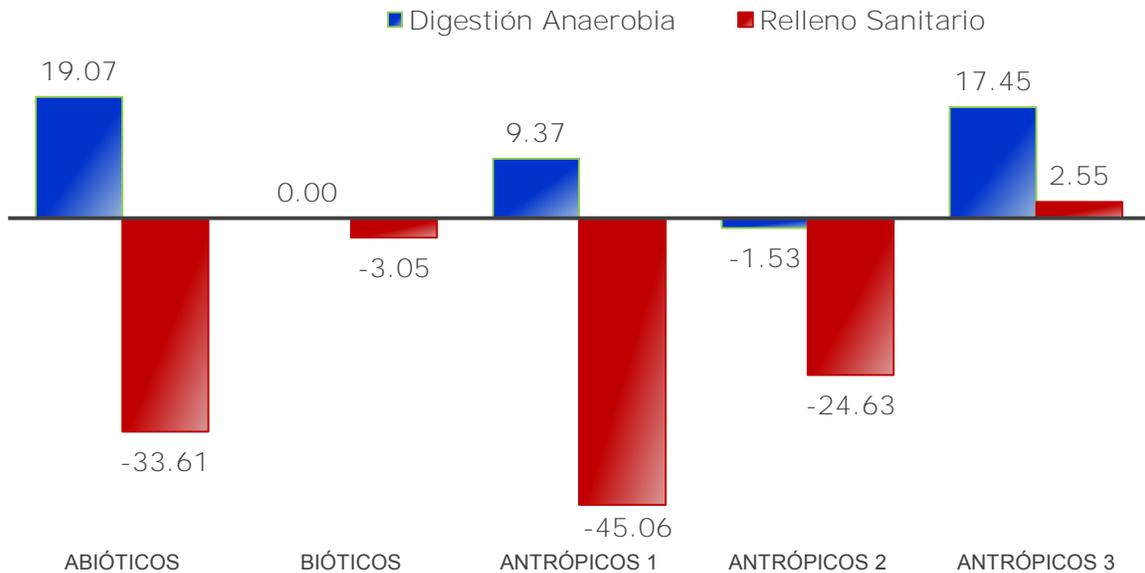
La Tabla 31 muestra el impacto global de la etapa de operación de la planta de digestión anaerobia y el relleno sanitario en los factores abióticos, bióticos y antrópicos.

**Tabla 31.** Magnitud del impacto de cada tecnología en los factores abióticos, bióticos y antrópicos en la etapa de operación.

Tipo de Factores	Digestión Anaerobia	Relleno Sanitario
Abióticos	19.07	-33.61
Bióticos	0.00	-3.05
Antrópicos 1	9.37	-45.06
Antrópicos 2	-1.53	-24.63
Antrópicos 3	17.45	2.55
Magnitud de Impacto Total	<b>44.36</b>	<b>-103.80</b>

Los resultados de la Tabla 31 son representados en la Gráfica 3, en la cual se observa que la magnitud del impacto de la digestión anaerobia es positivo en la mayoría de los factores.

**Gráfica 3.** Magnitud de Impacto de la etapa de operación de la planta de digestión anaerobia vs relleno sanitario.



Enseguida, en la Tabla 32, se presenta la magnitud de impacto de todas las actividades sobre los factores abióticos.





**Tabla 32.** Magnitud de impacto de las actividades de la digestión anaerobia vs relleno sanitario en los factores abióticos.

Etapa	Tipo de Factor:	Abiótico							
	Elementos:	Aire		Agua				Suelo	
	Atributo afectado/ Actividad	Calidad del Aire		Calidad		Consumo		Características físicas, químicas y biológicas.	
		DA	RS	DA	RS	DA	RS	DA	RS
Construcción	Transporte de insumos	-1.03	-1.03						
	Vías de acceso	-1.29	-1.29					-2.28	-4.06
	Limpieza del sitio.	-1.80	-1.80					-3.19	-5.68
	Cimentación		-1.54			-0.27		-2.73	-3.68
	Equipamiento				1.52	-0.18	-0.18	-1.82	1.66
	Red efluentes.			1.35	1.35	-0.18	-0.18	-1.82	-1.82
	Red biogás	3.96	3.96			-0.18	-0.13	-1.82	-1.82
	Cerca perimetral					-0.13	-0.46		
	Infraestructura					-0.46		-2.46	-2.46
	Residuos sobrantes			-1.35	-1.35			-1.66	-2.46
Operación	Recepción RSOM	-0.50	-0.50					-0.50	-0.50
	Recuperación RSM						-0.51		
	Tratamiento RSOM	4.78	-4.78			-2.15	-0.36		-9.34
	Mantenimiento	2.06	2.06			-0.36		-0.79	-0.79
	Aprovechamiento Biogás	9.11	-6.83						
	Tratamiento de efluentes			2.63	-5.01			4.78	-7.06





En la Tabla 32, el impacto de mayor magnitud positiva está resaltado en azul, mientras que en color rojo está resaltado el impacto de mayor magnitud negativa.

- Aire

En la afectación a la calidad del aire, las actividades involucradas de mayor relevancia son: el tratamiento de los RSOM y el aprovechamiento de biogás. Las dos actividades en el relleno sanitario representan un impacto negativo, debido a que en ellas hay emisión de gases a la atmósfera. En la mayoría de los rellenos sanitarios de nuestro país la captación y quema de biogás no tiene control, es decir hay una emisión incontrolada de metano a la atmósfera.

En contraste, estas dos actividades en la digestión anaerobia, representan un impacto positivo porque se evita la emisión de metano que tiene un potencial 21 veces mayor que el CO<sub>2</sub> en el efecto invernadero.

- Agua

Al analizar los resultados para la calidad y consumo, se observa que el impacto negativo es debido a la generación de residuos pues el riesgo de contaminación de cuerpos de agua se debe principalmente a la presencia de los residuos peligrosos que se generen.

Por el contrario, al generar digestatos y/o efluentes fertilizantes se está evitando la generación de residuos contaminantes; es por eso que esta actividad tiene impacto positivo; siempre y cuando cumplan con la calidad que especifica la normatividad mexicana.

Los impactos negativos en el consumo de agua tienen su origen en obras de construcción, arranque del proceso y mantenimiento; la magnitud es muy pequeña, pues se considera que el consumo de agua





necesario en estas actividades es mínimo; incluso el consumo de agua es una variable que se controlará para evitar aumentar los costos de la planta, y por consecuencia se evitará un consumo excesivo.

- Suelo

En la afectación a las características físicas, químicas y biológicas la mayoría de las magnitudes de impacto son negativas a excepción de la actividad de equipamiento para el relleno sanitario, que se trata de la impermeabilización de la base del terreno, que es una actividad preventiva para evitar la contaminación.

La afectación al elemento suelo es uno de los de mayor magnitud en el caso del relleno sanitario debido a que la afectación a sus características es directa. Como en el caso de la limpieza del sitio, que se refiere a la deforestación de la cobertura vegetal. A pesar de esto, en el caso de esta actividad el impacto depende de tipo de uso de suelo en el sitio de instalación, pues existe la posibilidad que en el sitio no exista flora, como en el caso de áreas pavimentadas.

En cuanto a la generación de residuos, el impacto es de una magnitud elevada, porque el riesgo de contaminación es latente. Para la DA el impacto positivo por la generación de digestato o efluentes fertilizantes, se debe a que con esta actividad se evita la generación de residuos sólidos o líquidos de mayor toxicidad.

La Tabla 33, contiene los resultados de magnitud de impacto de todas las actividades sobre los factores bióticos. En la calificación hecha, se determina que la mayoría de las actividades no tuvieron impacto sobre la disminución de especies nativas y la generación de fauna nociva.





**Tabla 33.** Magnitud de impacto de las actividades de la digestión anaerobia vs relleno sanitario en los factores bióticos.

Etapa	Tipo de Factor:	Biótico			
	Elementos:	Flora y fauna			
	Atributo afectado/ Actividad	Disminución de especies nativas		Generación de fauna nociva	
		DA	RS	DA	RS
Construcción	Transporte de insumos				
	Vías de acceso	-1.71	-2.26		
	Limpieza del sitio.	-1.77	-3.16		
	Cimentación				
	Equipamiento				
	Red efluentes.				
	Red biogás				
	Cerca perimetral			0.35	0.35
	Infraestructura				
	Residuos sobrantes				
Operación	Recepción RSOM				
	Recuperación RSM				-0.88
	Tratamiento RSOM				-2.17
	Mantenimiento				
	Aprovechamiento Biogás				
	Tratamiento de efluentes				

La Tabla 33, muestra que la magnitud de impacto tanto positivo como negativo en los factores bióticos: flora y fauna, es muy pequeña; del orden de -3.16 a 0.35. Para la digestión anaerobia se considera que la instalación de la planta no se hará en un lugar con gran diversidad biológica (la deforestación de la cobertura vegetal será mínima o no se hará).

Debido a la capacidad de la planta de digestión anaerobia, no se requiere almacenar grandes cantidades de residuos sólidos orgánicos urbanos durante varios días, por lo tanto la magnitud de impacto de la generación de fauna nociva es mínima.





En cuanto a la magnitud de impacto al paisaje, y por las emisiones de ruido y olores, los resultados son mostrados en la Tabla 34.

En general, las actividades de la etapa de construcción son las que afectan la percepción de las cualidades estéticas del sitio de instalación para ambos proyectos. Adicionalmente la disposición de los RSU en el relleno sanitario afecta también este factor.

En el caso del impacto ocasionado por la generación de ruido, de igual forma, están involucradas la mayoría de las actividades de la etapa de construcción, sin embargo la magnitud de su impacto es bajo, porque la intensidad de ruido emitida es de alcance puntual y su duración es instantánea; y su origen se debe a la utilización de maquinaria en estas actividades.

Y la última actividad que genera ruido es la de tratamiento de biogás y generación de energía eléctrica. Su magnitud (-4) es de las de mayor valor porque implicaría el uso de motores o cogeneradores con niveles de emisión de ruido altos.





**Tabla 34.** Magnitud de impacto de las actividades de la digestión anaerobia vs relleno sanitario en los factores antrópicos 1: paisaje, ruido y olores.

Etapa	Tipo de Factor:	Antrópico 1					
	Elementos:	Paisaje		Ruido		Olores	
	Atributo afectado/ Actividad	Cualidades estéticas.		Intensidad		Intensidad	
		DA	RS	DA	RS	DA	RS
Construcción	Transporte de insumos			-1.63	-1.63		
	Vías de acceso	-1.86	-1.86	-2.04	-2.04		
	Limpieza del sitio.	-1.93	-2.60	-0.84	-2.86		
	Cimentación		-2.23	-0.72	-2.45		
	Equipamiento	-1.10		-0.48	-0.48		
	Red efluentes.	-1.10	-1.10	-0.48	-0.48		
	Red biogás	-0.62	-0.62	-0.48	-0.48	2.40	2.40
	Cerca perimetral	1.48	1.48				
	Infraestructura	-0.62	-0.62				
	Residuos sobrantes	-0.24	-0.24				
Operación	Recepción RSOM			-2.04	-2.04	-0.60	-1.56
	Recuperación RSM		-1.17				
	Tratamiento RSOM		-5.66	-5.80	-7.45	5.80	-9.66
	Mantenimiento			-0.96	-0.96		
	Aprovechamiento Biogás			-3.59		9.66	-6.90
	Tratamiento de efluentes					6.90	-9.66





En lo que respecta a la generación de olores, la recepción de los residuos orgánicos es la fuente de impacto. No obstante, el tiempo de recepción y almacenamiento de los RSOM en una planta de DA es corto, por lo tanto su magnitud es menor a uno.

La intensidad de emisión de olores depende del tipo de residuos que se generen. Mientras que la obtención de digestato en un sistema cerrado como una planta de DA, evita la dispersión de olores, siempre y cuando cumplan con los controles de calidad correspondientes. En contraste, la disposición de RSOM en el relleno sanitario incluso la obtención de composta, representan una fuente de dispersión de olores.

Para comprender la magnitud positiva (9.66) del impacto generado del tratamiento del biogás en este factor (intensidad de olores), la comparación con el relleno sanitario es apropiada. Es decir, en un relleno sanitario la disposición final de los RSU genera una gran cantidad de olores, que se suman a los emitidos por la liberación de biogás que contiene sulfuro de hidrógeno; en épocas de estiaje y cuando hay mucho viento, estos olores afectan no sólo al personal del sitio de disposición final, sino que también es afectada la población local, de las áreas localizadas a corta y media distancia del sitio. Un ejemplo muy claro es el relleno sanitario de Bordo Poniente, cuyas emisiones de olores afectan a la población de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México que vive en sus alrededores.

Al tratar los residuos orgánicos en un proceso cerrado, como la digestión anaerobia, las emisiones de olores estarían más controladas.

Asimismo, al dar tratamiento al biogás generado, eliminando el sulfuro de hidrogeno y otros gases contaminantes, ya no hay emisiones incontroladas de olores de gases tóxicos y se está resolviendo una problemática que afecta a la población local.





La Tabla 35 contiene la magnitud de impacto en la seguridad industrial, la salud ocupacional y el factor socio-económico evaluado.

Para cada actividad se analizó su potencial para causar condiciones seguras en la planta y su potencial para causar afectaciones a la salud humana.

Las actividades: construcción de cimentaciones, de cerca perimetral y mantenimiento de las instalaciones representan un impacto positivo porque son de carácter preventivo.

Por ejemplo, la construcción de cerca perimetral evitará que gente no autorizada entre a la planta. La construcción de cimentaciones evitará hundimientos en un futuro. El mantenimiento es de carácter obligatorio y ayudará a encontrar fallas o fugas.

El tratamiento del biogás y digestato para la generación de subproductos, como la energía eléctrica y fertilizantes líquidos evitarán la generación de residuos. En el caso contrario, el personal está expuesto y la afectación de la salud será principalmente por las características CRETIB de los residuos.

Por último, tres actividades tienen impacto positivo en la categoría de factores socio-económicos. Aunque la magnitud del impacto de la recuperación de residuos aprovechables (lo que coloquialmente se conoce como pepena) es baja, este dato se justifica si se toma en cuenta que la materia prima es la fracción orgánica de los RSU y la cantidad de inorgánicos como papel, plástico entre otros es mínima.

La generación de energía eléctrica, energía térmica a partir del biogás y de fertilizantes a partir del digestato, prácticamente transforma lo que antes era "basura" en productos comercializables, y esto se refleja en la magnitud de impacto obtenida.





**Tabla 35.** Magnitud de impacto de las actividades de la digestión anaerobia vs relleno sanitario en los factores antrópicos 2(seguridad industrial y salud ocupacional) y antrópicos 3(socio-económicos).

Etapa	Tipo de Factor:	Antrópico 2				Antrópico 3	
	Elementos:	Seguridad Industrial		Salud ocupacional		Socio- económicos	
	Atributo afectado/ Actividad	Generación condiciones seguras		Afectación a la salud humana		Valorización de subproductos	
		DS	RS	DS	RS	DS	RS
Construcción	Transporte de insumos	-0.40	-0.40				
	Vías de acceso						
	Limpieza del sitio.						
	Cimentación	3.72	-2.52				
	Equipamiento	-1.68	-1.68	-0.40	-0.40		
	Red efluentes.						
	Red biogás	1.68	1.68	-0.40	-0.40		
	Cerca perimetral	1.26	1.26	0.78	0.78		
	Infraestructura	1.68	1.68	1.68	1.68		
	Residuos sobrantes						
Operación	Recepción RSOM			-0.50	-0.50		
	Recuperación RSM	1.95	-1.95		-1.95	1.35	2.55
	Tratamiento RSOM	-1.15	-5.29	-1.15	-5.29		
	Mantenimiento	2.08	2.08				
	Aprovechamiento Biogás	-5.75	-6.90			8.05	
	Tratamiento de efluentes	2.99	-4.83			8.05	





### 5.1.3 Propuestas de medidas de prevención y mitigación

Los impactos ambientales de mayor relevancia se presentarán por la ejecución de las siguientes actividades: la generación de residuos, las obras de construcción, la generación de ruido y olores, por lo que en la Tabla 36 se enuncian algunas NOM que de cumplirse contribuyen a prevenir y mitigar los impactos generados.

**Tabla 36.** Identificación de impactos en el sitio.

Componente ambiental	Acciones u actividades	Impactos	Medidas de mitigación propuestas
Aire	Excavación y nivelación del terreno. Traslado de material y equipo para la construcción. Emisión de gases de efecto invernadero.	Alteración de la calidad del aire por emisión de gases y dispersión de polvos.  Alteración del confort sonoro	Cumplimiento de: NOM-004-STPS-1999 NOM-011-STPS-2001 NOM-043-SEMARNAT-1993 NOM-081-SEMARNAT-1994 NOM-085-SEMARNAT-1994
Suelo	Limpieza del terreno. Actividades de excavación, compactación y cimentación.  Disposición de residuos sólidos residuales	Alteración de las características físico-químicas	Cumplimiento de : NOM-052-SEMARNAT-2005 NOM-004-SEMARNAT-2002
Agua	Disposición de lixiviados	Alteración de las características físico-químicas	Cumplimiento de: NOM-001-SEMARNAT-1996 NOM-002-SEMARNAT-1996 NOM-003-SEMARNAT-1997

Los anteriores resultados correspondientes a la evaluación de impacto ambiental que se ha realizado, sirven como referencia para la ejecución de la evaluación de riesgo y elaboración de la tabla de gestión de riesgo para la DA.



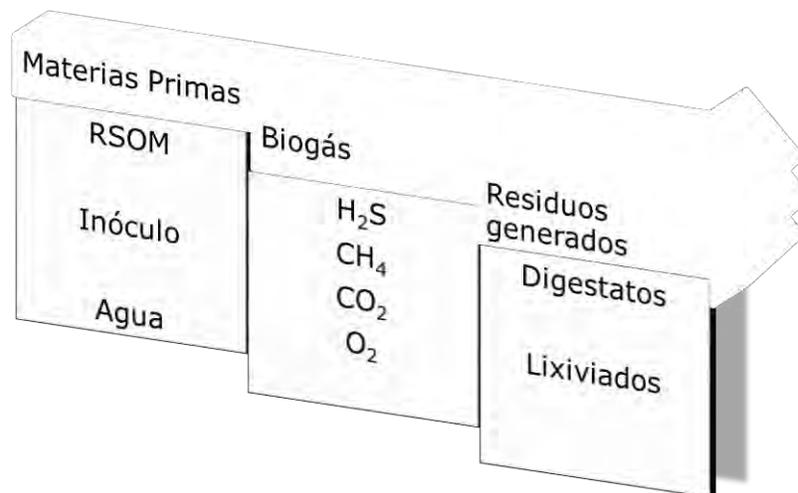


## 5.2 Evaluación de riesgo ambiental

Continuando con el desarrollo de las evaluaciones, en esta sección se presenta la Evaluación de Riesgo del caso de estudio.

### 5.2.1 Identificación de materiales y agentes químicos

La identificación del peligro es el proceso de determinar cuáles son los compuestos químicos que en menor o mayor medida pueden causar efectos adversos en el ambiente, la salud y la seguridad debido a la exposición a concentraciones específicas y por determinado periodo de tiempo. La Figura 28 clasifica los agentes químicos de interés involucrados en el proceso.



**Figura 28.** Sustancias y materiales en el proceso de DA de RSOM

Si los RSOM son acumulados durante varios días en la planta sin ningún tipo de tratamiento representan una fuente de generación de vectores como insectos y roedores (moscas, mosquitos, cucarachas y ratas) En la alimentación; además si no hay una separación adecuada de RSM en la fuente los RSOM pueden incluir materiales peligrosos como medicamentos.





La composición del biogás depende en gran medida de su origen, como se puede observar en la Tabla 37, que presenta la composición de biogás obtenido a partir de plantas de biogás, lodos de aguas residuales y rellenos sanitarios.

**Tabla 37.** Información general de las composiciones de biogás a partir de diferentes fuentes.

Componente	Planta de Biogás	Lodos de aguas residuales	Rellenos sanitarios
CH <sub>4</sub> (%)	60-70	55-65	45-55
CO <sub>2</sub> (%)	30-40	35-45	30-40
N <sub>2</sub> (%)	<1	<1	5-15
H <sub>2</sub> S (ppm)	10-2000	10-40	50-300

**Fuente:** (De Hullu, et al., 2008).

La Tabla 38 contiene la composición del biogás que se obtiene específicamente de plantas de biogás que tratan RSOM, y como se observa contiene además otras sustancias químicas además de las enlistadas en la Tabla 37, por ejemplo: vapor de agua, amoniaco, hidrógeno, entre otros.

**Tabla 38.** Composición típica del biogás obtenido de RSOM.

Componente	Cantidad
Metano, CH <sub>4</sub> (Vol. %)	55-70
Dióxido de carbono, CO <sub>2</sub> (Vol. %)	30-45
Vapor de Agua, H <sub>2</sub> O	Saturado
Nitrógeno, N <sub>2</sub> (Vol. %)	0-1
Oxígeno, O <sub>2</sub> (Vol. %)	0-1
Sulfuro de hidrógeno, H <sub>2</sub> S (ppm)	200-4000
Monóxido de carbono, CO (Vol. %)	0-1
Hidrógeno, H <sub>2</sub> (Vol. %)	<1
Amoniaco, NH <sub>3</sub> (Vol. %)	Trazas
Constituyentes en cantidades trazas, compuestos orgánicos.	Trazas

**Fuente:** Adaptado de (Braber, 1995; Bradfer, 2002; Al Seadi, et al., 2008; (Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, 2010; Agencia Andaluza de la Energía, 2011).





El biogás es en general más liviano que el aire, es un gas incoloro, tóxico y combustible. Características que adquiere de sus componentes que tienen propiedades físico-químicas y toxicidades distintas como el metano, el dióxido de carbono, el sulfuro de hidrógeno ente otros; que generan situaciones en el proceso como las que son presentadas en la Tabla 39. En el Anexo 4 se presentan las hojas de seguridad para el sulfuro de hidrógeno y el metano.

**Tabla 39.** Sustancias contaminantes en el biogás y sus efectos.

Sustancia/material	Efecto
Sulfuro de hidrógeno, H <sub>2</sub> S	Corrosión, Toxicidad, Formación de ácido sulfúrico.
Vapor de Agua, H <sub>2</sub> O	Formación de Condensados Formación de soluciones ácidas
Dióxido de carbono, CO <sub>2</sub>	Reducción de poder Calorífico
Amoniaco, NH <sub>3</sub>	Formación de óxidos de nitrógeno durante la combustión
Partículas sólidas	Obturación

**Fuente:** (Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, 2010).

### 5.2.2 Peligros asociados a la operación de plantas de DA

Los peligros operacionales son una fuente de riesgos comunes a todo tipo de plantas; son ocasionados por prácticas laborales inadecuadas o por la escasa información sobre los riesgos laborales. Por ejemplo, al no utilizar equipo de protección personal, los trabajadores están expuestos al contacto directo con las sustancias involucradas en el proceso, a las emisiones de olores y fuentes de ruido como trituradoras, cribas o cintas transportadoras.

La planta piloto empleará una digestión anaerobia húmeda para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Las condiciones estimadas de operación del biodigestor son mostradas en la Tabla 40, que en condiciones normales de operación no son peligrosas.





**Tabla 40.** Condiciones de operación del biodigestor.

Digestión Anaerobia húmeda	
Capacidad de tratamiento	1 Ton
Temperatura	37°C
Tiempo de retención	20 días
Presión	1 bar

Si no existe un control en la condiciones anteriores están podrían ser un peligro. Kolluru *et al.* (1998), enlistan los peligros más comunes que se presentan en centros de trabajo con procesos químicos. De su lista, algunos peligros que pueden presentarse en una planta de digestión anaerobia se muestran en la Tabla 41.

**Tabla 41.** Peligros más comunes en centros de trabajo que involucran procesos químicos

• Manejo de sustancias químicas	• Presencia de gases y vapores (incluyendo asfixiantes)
• Polvo, fibras y partículas de materias respirables	• Agentes biológicos
• Fuentes de electrocución	• Fuentes de calor
• Oxígeno deficiente en espacios confinados	• Ruido (pérdida del oído)
• Problemas músculo-esqueléticos (por ejemplo, lesiones en la espalda)	• Desórdenes motrices debido a la falta de ergonomía

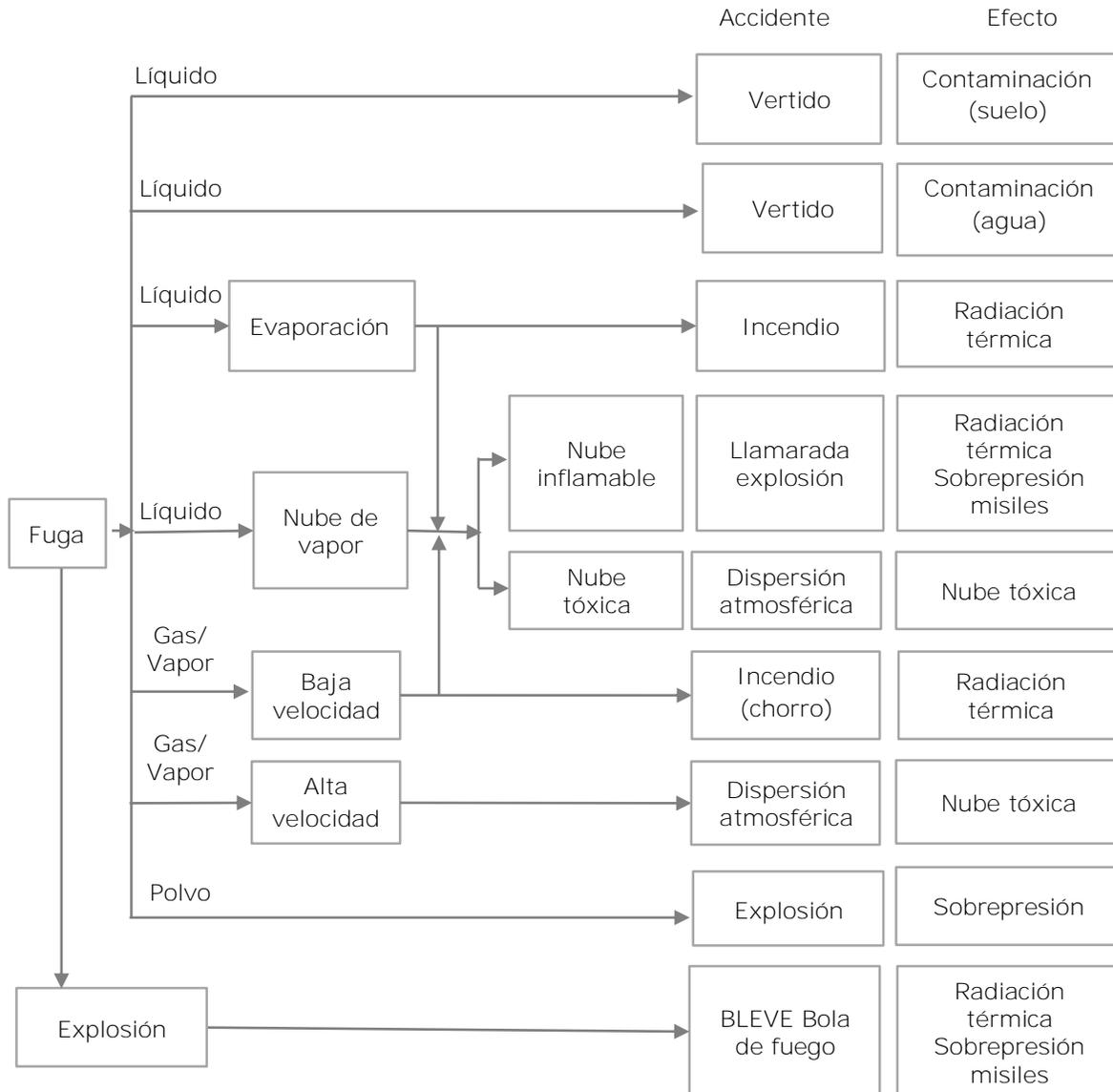
**Fuente:** Adaptado de (Kolluru, *et al.*, 1998)

### 5.2.3 Descripción del riesgo de fuga de la planta de DA

En todos los procesos químicos, uno de los principales riesgos es la liberación, accidental o no, de algunas de las sustancias, este hecho puede ocasionar un evento de consecuencias negativas. En otras palabras, la fuente de peligro para la seguridad de las plantas está asociada con los puntos susceptibles de fuga.

El esquema de la Figura 29 clasifica el tipo de accidente y el efecto que puede ocurrir tomando en cuenta el estado físico de la sustancia que esté involucrada en una fuga.





BLEVE "*boiling liquid expanding vapour explosion*" (explosión de vapores que se expanden al hervir el líquido)

**Figura 29.** Esquema simplificado de los diversos incidentes que pueden ocurrir en caso de existir una fuga. Fuente: (Casal Fàbrega & Vilchez Sánchez, 2010)

Por ejemplo, si el material involucrado es el lixiviado, entonces el posible efecto será la contaminación de suelo o agua.

Si la fuga del compuesto es en forma de gas o vapor el accidente sería un incendio o una explosión y el efecto podría ser la formación de nubes tóxicas, radiación térmica entre otros.

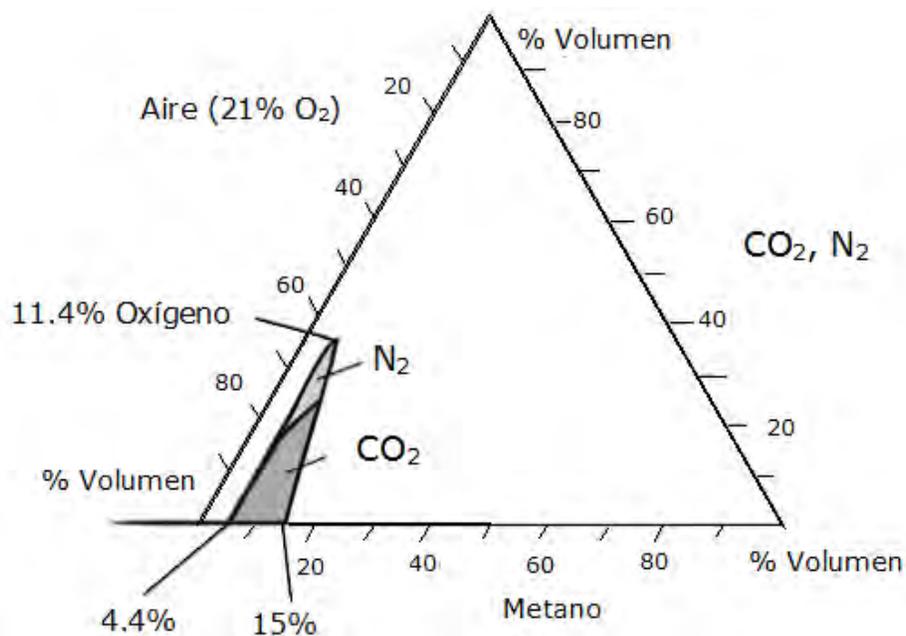




En los sistemas de DA, la fuga de biogás es la de mayor importancia debido a su inflamabilidad y explosividad al combinarse con el oxígeno contenido en el aire.

Los límites de explosión a temperatura ambiente pueden ser vistos en el diagrama triangular de la Figura 30; la mezcla metano-oxígeno es peligrosa con una concentración de metano entre 4.4 y 15% y una concentración de oxígeno de 11.4% en el ambiente.

Para prevenir este riesgo, existen guías técnicas que regulan lo concerniente a fluidos inflamables (EPA, 1994) y que se derivaron de las regulaciones sobre los sistemas eléctricos en espacios en dónde hay un alto riesgo de explosión, para determinar el nivel de seguridad necesario.



**Figura 30.** Límites de explosión a 25°C para mezclas de diferentes gases.  
Fuente: (Deublein & Steinhauser, 2008)

En consecuencia, la clave es identificar también peligros asociados a los sistemas de generación de electricidad, a continuación se enlistan algunos de ellos:

- Electrocutación debido a:



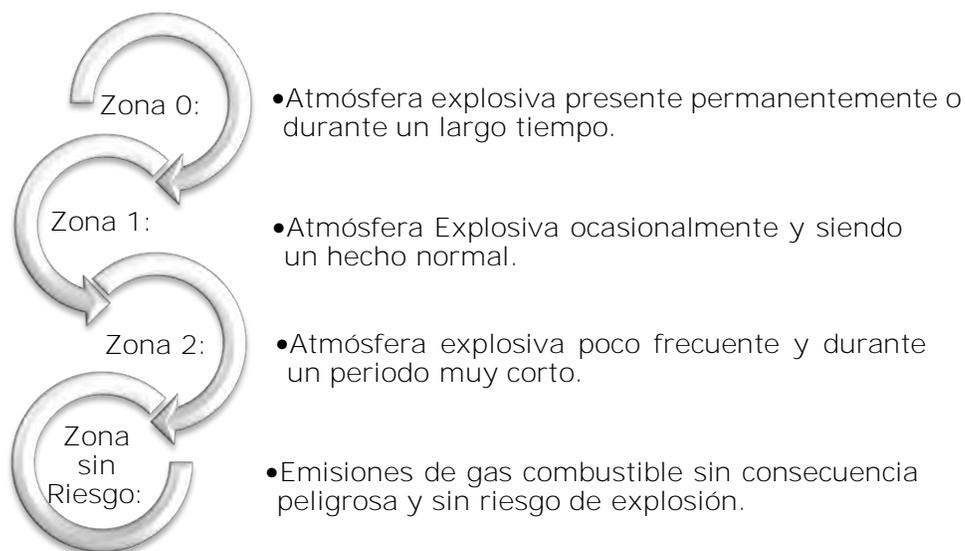


- Contacto eléctrico, directo o indirecto, con instalaciones eléctricas, herramientas o máquinas dañadas.
- Modificaciones en las instalaciones o en los equipos eléctricos originales.
- Presencia de fuentes de ignición:
  - cigarrillos,
  - chispas eléctricas,
  - instalación eléctrica,
  - electricidad estática.

#### 5.2.4 Zonas de protección en las instalaciones de la planta de DA

Los espacios con riesgos de explosión son clasificados en diferentes zonas de ocurrencia de una atmósfera explosiva y peligrosa; en donde se espera que existan mezclas explosivas de gases, vapores o nieblas, por ejemplo: en las proximidades del contenedor de biogás o del biodigestor (Deublein & Steinhauser, 2008).

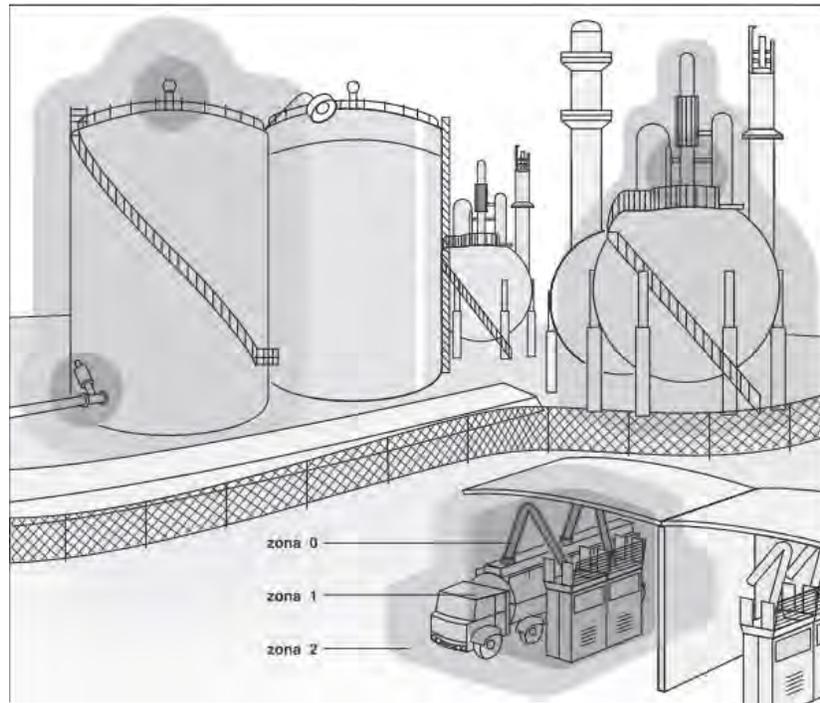
Existen por lo menos cuatro zonas de peligro que son mostradas en la Figura 31.



**Figura 31.** Definición de las cuatro zonas de peligro de explosión. Adaptado de (Bradfer, 2002).



En la Figura 32 se muestra un ejemplo de ubicación de zonas de riesgo.



**Figura 32.** Esquema de ejemplo para una zona explosiva con gases. Adaptado de (Asconumatics, 2012)

- Una Zona 0 puede ser el interior de un biodigestor, el contenedor de biogás, la toma de aire del motor de combustión, la cámara de combustión del quemador de gas incluyendo además toda la tubería de biogás con sus componentes. Una condición especial de operación se da cuando el aire entra al interior del biodigestor. Bajo condiciones normales de operación, una pequeña presión positiva previene la penetración del aire al biodigestor (Deublein & Steinhauser, 2008).
- Una Zona 1 corresponde a un lugar donde en funcionamiento normal hay presencia de gas, la cual se determina en un radio de 3 metros alrededor del punto emisor, de un alivio de gas, un drenaje o una válvula. En lugares cerrados, el espacio en peligro de extinción se extiende a una periferia de 4.5m (Deublein & Steinhauser, 2008).





- Una Zona 2 se observa con una frecuencia de ocurrencia menor y por corto tiempo, o también se extiende a tres metros más allá de una Zona 1, excepto condiciones particulares; por ejemplo cuando no hay buena ventilación (Bradfer, 2002).
- La zona 3 es la zona de seguridad, en la que no se presenta riesgo de explosión.

### 5.2.5 Descripción del riesgo a la salud por la exposición a H<sub>2</sub>S

La exposición a agentes peligrosos y la ocurrencia de condiciones inseguras tienen efecto principalmente en la salud y bienestar humanos, debido a que las afectaciones se verán reflejadas en la comunidad y su percepción de daño al ambiente.

Además del metano, que es un gas asfixiante para el ser humano, el sulfuro de hidrógeno, **que es un gas incoloro y con olor a "huevo podrido"**, es también inflamable y extremadamente peligroso; la Tabla 42, contiene un resumen toxicológico de este gas.

Para prevenir los efectos de la Tabla 42 se recomienda NO depender del sentido de olfato para indicar la presencia continua de este gas o para la advertencia de concentraciones peligrosas, se recomienda la instalación de detectores de gases (OSHA, 2012).

Lo anterior recomendación es debido a que el H<sub>2</sub>S es más pesado que el aire y puede acumularse en áreas bajas y cerradas, pobremente ventiladas, como sótanos (OSHA, 2012).





**Tabla 42.** Efectos a la salud por exposición a sulfuro de hidrógeno.

Concentración de H <sub>2</sub> S (ppm)	Efecto
0.008-0.2	Umbral respiratorio- se detecta olor a huevo podrido
20	Olor a fuga de gas Tolerancia durante algunas horas sin daño
Mayor a 50 durante una hora	Puede producir conjuntivitis con dolor, lagrimeo y fotofobia
50 (exposición prolongada)	Puede causar rinitis, faringitis, bronquitis y neumonitis
100 durante 15 min.	Fatiga olfatoria
250 (exposición prolongada)	Puede causar edema pulmonar
500	Puede detener la respiración, coma, inconsciencia y muerte.
1000 a 2000	La inhalación puede provocar sensación paralizante del olfato y causa inconsciencia instantánea; también puede presentar convulsiones, coma y alta probabilidad de muerte

**Fuente:** (IIAR, 2010; IVHHN, 2012).

### 5.2.6 Criterios para implementar medidas de seguridad, prevención y mitigación.

La propuesta de medidas para la gestión de los riesgos más significativos, está dirigida a la preservación de la calidad ambiental, la prevención de enfermedades y discapacidades a través de la implementación de medidas de seguridad. No obstante, antes de proponer medidas de prevención o mitigación, es fundamental contar con la información de la Tabla 43.

**Tabla 43.** Información de población potencialmente afectable.

▪ Trabajadores
▪ Personal Externo (visitantes, contratistas)
▪ Población asentada en un radio de 1 km
▪ Centros de concentración de personas ubicadas en un radio de 1km (iglesias, cines, escuelas, hospitales.)





Adicionalmente durante el desarrollo de la ingeniería conceptual de la planta piloto de Digestión Anaerobia, debe incluirse un ***factor de seguridad***.

Los biodigestores de gran escala están diseñados con factores de seguridad, por diversas razones entre ellos:

- La falta de control del operador
- La variabilidad de la corriente de alimentación
- Las fluctuaciones en las condiciones de operación

Los factores de seguridad en los sistemas de tratamiento biológico son diferentes de los utilizados en las estructuras. Por ejemplo, el mínimo TRS (tiempo de retención de sólidos), se multiplica por un factor de seguridad debido a que el mínimo TRS es el límite de fallo del sistema (Rowse, 2011).

Es importante tener un factor de seguridad elevado, especialmente, en las zonas en donde habrá fluctuaciones en la temperatura ambiente, en la alimentación de sustrato con el tiempo, supervisión limitada del operador o sin control de proceso (Rowse, 2011).

#### 5.2.7 Matriz de gestión del riesgo para plantas de DA para el tratamiento de la FORSU.

---

A continuación se presenta la matriz de gestión de riesgo para plantas de digestión anaerobia para tratar RSOM dividida en secciones. La Tabla 44 contiene la sección de información acerca de la fuente de riesgo y el daño que definen el evento. La Tabla 45 enuncia el receptor y la vía de exposición. La Tabla 46 contiene la sección de juicio (la probabilidad de exposición, la consecuencia y la magnitud del riesgo). La Tabla 47 presenta la sección de respuesta al riesgo.





**Tabla 44.** Matriz de gestión de Riesgo Sección 1: identificación de la fuente, el daño y la descripción del evento

FUENTE	DAÑO	DESCRIPCIÓN DEL RIESGO
Emisiones de NO <sub>x</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> S y otros gases.	Contribución a la acumulación de gases de efecto invernadero. Daño a la salud humana: irritación respiratoria y enfermedad.	1. Daño a la salud por las emisiones de gases. Y alteración de la calidad de aire
La liberación de microorganismos		2. Daño a la salud por la liberación de microorganismos
Olor	Molestia,	3. Molestia por emisión de olores
Ruido y vibración	Daño a la salud humana	4. Molestia, pérdida del sentido del oído por emisión de ruido y vibración
Uso de maquinaria	Lesiones corporales	5. Lesiones corporales por uso de maquinaria.
Incendio accidental o no, que causa la liberación de contaminantes a la atmósfera (humos o vapores), el agua o la tierra; explosión de biogás.	Irritación respiratoria, enfermedades y molestias a la población local. Lesiones al personal. La contaminación del agua, aire y suelo.	6. Lesiones, afectación a la salud humana y contaminación del ecosistema debido a incendio y emisión de contaminantes
Derrames de líquidos, incluyendo lixiviados y combustibles derivados del petróleo.	Muerte de flora y fauna. Deterioro de la calidad del cuerpos de agua superficiales y subterráneos Contaminación de suelo	7. Contaminación del suelo y cuerpos de agua por derrame de efluentes líquidos. Potencial afectación a flora y fauna.





**Tabla 45.** Matriz de gestión de riesgo. Sección 2: identificación del receptor y vía de exposición o transporte

DESCRIPCIÓN DEL RIESGO	RECEPTOR:	VÍA:
1. Daño a la salud por las emisiones de gases. Y alteración de la calidad de aire	Operadores, población local y el ambiente local	Vía aérea y después inhalación.
2. Daño a la salud por la liberación de microorganismos	Operadores, población local	Vía aérea y después inhalación.
3. Molestia por emisión de olores	Operadores, población local, flora y fauna	Vía aérea y después inhalación.
4. Molestia, pérdida del sentido del oído por emisión de ruido y vibración	Operadores, población local, flora y fauna	El ruido por el aire y vibración a través del suelo.
5. Lesiones corporales por uso de maquinaria.	Operadores	Contacto físico directo.
6. Lesiones, afectación a la salud de la población y contaminación del ecosistema debido a incendio y emisión de contaminantes	Operadores, población local y el medio ambiente local	Transporte aéreo de humo. Derrames y contaminación por la escorrentía directa a cuerpos de agua superficiales y drenajes. Dispersión del digestato.
7. Contaminación del suelo y cuerpos de agua por derrame de efluentes líquidos Potencial afectación a flora y fauna	Cuerpos de agua superficial y subterránea. Flora y fauna	Derrames y contaminación por la escorrentía directa a cuerpos de agua superficiales, zanjas y drenajes. Transporte a través del suelo.





**Tabla 46.** Matriz de Gestión de Riesgos. Sección 3 Juicio: Probabilidad de exposición, consecuencia y magnitud del riesgo

DESCRIPCIÓN DEL RIESGO	PROBABILIDAD DE EXPOSICIÓN	CONSECUENCIA	MAGNITUD DE RIESGO	JUSTIFICACIÓN DE LA MAGNITUD
1 Daño a la salud por las emisiones de gases. Y alteración de la calidad de aire	Baja	Dañina	Tolerable (2)	Existe la posibilidad de exposición de quien vive cerca del lugar. El monitoreo de los niveles de H <sub>2</sub> S en las plantas de biogás ha demostrado que su concentración está típicamente presente por arriba de los niveles de referencia (EPA, 2009).
2 Daño a la salud por la liberación de microorganismos	Media	Dañina	Moderado (4)	Potencial de liberación en la recepción, tratamiento y fermentación de la fracción orgánica de los RSU.
3 Molestia por emisión de olores	Baja	Dañina	Tolerable (2)	La población local a menudo es sensible a los olores. La variedad de la composición de los RSU puede causar problemas de olores en el área de recepción. Una fuga de biogás puede ser la causa de emisión de olores.
4 Molestia, pérdida del sentido del oído por emisión de ruido y vibración	Media	Dañina	Moderado (4)	La población local a menudo es sensible al ruido y las vibraciones pero existe un bajo potencial de exposición.





DESCRIPCIÓN DEL RIESGO	PROBABILIDAD DE EXPOSICIÓN	CONSECUENCIA	MAGNITUD DE RIESGO	JUSTIFICACIÓN DE LA MAGNITUD
5. Lesiones corporales por uso de maquinaria.	Baja	Dañina	Tolerable (2)	El contacto físico directo se reduce al mínimo debido a que la actividad se lleva a cabo en biodigestores cerrados por lo que se estima un riesgo de baja magnitud.
6. Lesiones, afectación a la salud de la población y contaminación del ecosistema debido a incendio y emisión de contaminantes	Media	Extremadamente dañina	Importante (6)	A pesar de que el biogás es inflamable, el riesgo de contacto físico directo se reduce por que la actividad se lleva a cabo dentro de sistemas cerrados La probabilidad de ocurrencia es reducida por sistemas de seguridad y control eficaces. <b>Riesgo de combustión "accidental" de residuos es moderado.</b>
7. Contaminación del suelo y cuerpos de agua por derrame de efluentes líquidos Potencial afectación a flora y fauna	Baja	Extremadamente dañina	Moderado (3)	La probabilidad de contaminación del suelo, agua y la afectación a flora y fauna por derrames de efluentes líquidos se reduce si la calidad del digestato es alta





**Tabla 47.** Matriz de gestión de riesgo Sección 4: Acciones para la prevención o mitigación del riesgo

DESCRIPCIÓN DEL RIESGO	MAGNITUD DE RIESGO	GESTIÓN DEL RIESGO	RIESGO RESIDUAL
1 Daño a la salud por las emisiones de gases. Y alteración de la calidad de aire	Tolerable (2)	Las actividades deberán ser gestionadas y operadas de acuerdo con un sistema de gestión (incluirlá la inspección y mantenimiento de los equipos, incluidos los sistemas de generación de electricidad).  Incluir filtros para limpiar el biogás y verificar las emisiones de fuentes puntuales a la atmósfera con los límites de emisión de H <sub>2</sub> S, NO <sub>x</sub> , CO y CH <sub>4</sub> recomendados. Las actividades no se llevarán a cabo sin un área de gestión de la calidad del aire	Bajo
2 Daño a la salud por la liberación de microorganismos	Moderado (4)	Las actividades requeridas no se llevarán a cabo a menos de 250 metros de cualquier edificio fuera del sitio usado por el público incluyendo viviendas/casas. Las operaciones tienen que llevarse a cabo en un sistema cerrado con filtros adecuados o sistemas de depuración.	Bajo
3 Molestia y pérdida del confort por emisión de olores	Tolerable (2)	Las emisiones deberán estar exentas de olores. Implementar si es necesario un plan de gestión de olores, para emisiones de sustancias no controladas por los límites de emisión.  Todos los tanques de almacenamiento, de fermentación y el biodigestor están obligados a ser cerrados al igual que las áreas de recepción.  Mantener una zona de amortiguamiento para el olor a 250 metros de edificios, de forma que por debajo de este límite de control de olor se pueda evaluar en una medición permitida	Bajo
4 Molestia, pérdida del sentido del oído por emisión de ruido y vibración	Moderado (4)	Implementar si es necesario un plan de gestión para el ruido y la vibración. Las emisiones de ruido deberán cumplir con los límites máximos permisibles.	Bajo





DESCRIPCIÓN DEL RIESGO	MAGNITUD DE RIESGO	GESTIÓN DEL RIESGO	RIESGO RESIDUAL
5 Lesiones corporales por uso de maquinaria	Tolerable (2)	Las actividades deberán ser administradas y operadas de acuerdo con un sistema de gestión (que incluya las medidas de seguridad del sitio para evitar el acceso no autorizado).	Bajo
6 Lesiones y afectación a la salud de la población y el ecosistema debido a incendio y emisión de contaminantes	Importante (6)	<p>Plan de gestión de accidentes detallado en el sistema de gestión (que incluya incendios y derrames). Implementar sistemas de detección de gases, sistemas contra incendios, sistemas de barreras de tanques.</p> <p>Las fuentes de flamas, como fósforos, encendedores y cigarrillos no deben ser encendidas en el lugar donde se encuentre el recipiente de almacenamiento de biogás con el fin de minimizar el riesgo de explosión. (Rowse, 2011).</p>	Bajo
7 Contaminación del suelo y cuerpos de agua por derrame de efluentes líquidos Potencial afectación a flora y fauna	Moderado (3)	<p>Los tanques de fermentación requieren apropiados terraplenes. Todos los condensados de biogás deberán ser descargados en un sistema de drenaje cerrado.</p> <p>Se requiere una superficie impermeable para el almacenamiento de todos los residuos. Tener especial atención a los derrames de sustancias no controladas por los límites máximos permisibles.</p> <p>También las actividades no deberán realizarse a menos de 50 metros de cualquier manantial, o de cualquier pozo utilizado para el abastecimiento de agua para consumo humano. Esto debe incluir los suministros de agua privados.</p> <p>Las actividades no pueden llevarse a cabo dentro del área de protección de las aguas subterráneas. Es necesario una superficie impermeable para la planta de DA.</p>	Bajo





Por último, si en el proceso de Digestión Anaerobia para el tratamiento de RSOM no hay una gestión del riesgo, probablemente algunos de los eventos descritos sucederán y por consecuencia impactará en la confianza que se tiene del proyecto y de la tecnología.

La pérdida de la confianza en una tecnología puede ser importante, y puede impedir otros proyectos de digestión anaerobia para el futuro (Rittmann, 2001; Speece, 1996).

---

## 6. CONCLUSIONES

---

Para concluir es necesario retomar los objetivos, y alcances planteados desde el inicio de esta labor.

El objetivo rector de la tesis fue realizar la evaluación de impacto y riesgo ambiental **de una planta "piloto" de Digestión Anaerobia** de RSOM a partir de la evaluación conceptual de la DA como método de tratamiento de esta fracción de los RSU. Estas evaluaciones se realizaron cumpliendo a su vez los objetivos específicos enunciados.

Por consiguiente, se construyó una metodología que cumple con la identificación de impactos, su cuantificación e interpretación para realizar estas evaluaciones adaptando los recursos y herramientas disponibles. Es importante mencionar que no existe una metodología única que se adapte a todo tipo de proyecto, debido a que cada uno tiene sus particularidades, lo que sí se puede hacer es adaptar las metodologías existentes para construir una metodología que sea objetiva. La metodología que se construyó es flexible y puede ser aplicada a evaluaciones de otros proyectos.

También se estructuró el marco legal que puede ser consultado como una guía para las evaluaciones de riesgo e impacto de proyectos similares debido a que recopila los elementos esenciales de la legislación en estos temas.





Respecto a los resultados de las evaluaciones se encontró que los riesgos e impactos del proyecto para el ambiente, tendrán origen en las obras de construcción, la generación de residuos, las emisiones de ruido, olores y el manejo de biogás. Sin embargo, la selección del sitio adecuado para la instalación de la planta y la adopción de las medidas de seguridad disminuirá el impacto de las actividades.

En ese sentido, están planteadas propuestas de medidas de prevención y mitigación de impactos y para gestionar los riesgos que producirá la planta de Digestión Anaerobia en sus etapas de construcción y operación.

Estas fueron planteadas respetando las recomendaciones de las normas de seguridad establecidos en las normatividad mexicana, y las emitidas por las instituciones como la Organización Mundial de la Salud, la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional del Departamento del Trabajo de EE.UU (OSHA), la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU (EPA), la Asociación Alemana de Biogás, la Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GTZ) entre otras.

La evaluación de impacto muestra que la construcción y operación de una planta de DA produce menor cantidad de impactos adversos al ambiente y genera beneficios que contribuyen a mitigar en gran medida los impactos adversos generados por un relleno sanitario.

No obstante, con la EIA y ERA, se concluye que a pesar de que la Digestión Anaerobia como método de tratamiento de RSOM tiene beneficios ambientales respecto al relleno sanitario, con las evaluaciones hechas se encontró que no es una opción de tratamiento que esté exenta de generar impactos adversos al ambiente porque es una tecnología que depende de la cantidad de RSU para ser sostenible y además los peligros identificados son una fuente potencial de riesgo que se deben considerar en la implementación de esta tecnología.





Sin duda este trabajo contribuirá en el desarrollo del proyecto que está en marcha e incluso en futuros trabajos bajo la misma línea de investigación.

Se reconoce que al abrir la puerta en esta línea de investigación y evaluación ambiental, surgieron otros ejes y áreas para retroalimentar el análisis. Sin embargo, el logro del objetivo central se cumplió y los resultados son muy enriquecedores.





## 7. REFERENCIAS Y ANEXOS

### 7.1 Referencias

- Abbasi, T., Tauseef, S. M. & Abbasi, S. A., 2012. *Biogas Energy*. Primera ed. s.l.:Springer.
- Acurio, G., Rossin, A., Teixeira, P. F. & Zepeda, F., 1997. *Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en américa latina y el caribe.*, Washington, D.C: BID/OPS.
- Afifi, S., 2008. *Environmental Impact Assessment Environmental Impact Assessment. Tools and Techniques*, s.l.: Department of Environmental and Earth Science at Islamic University of Gaza.
- Agencia Andaluza de la Energía, 2011. *Estudio Básico del Biogás*, Andalucía, España: Agencia Andaluza de la Energía.
- AIChE/CCPS, 2000. *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis*. Segunda ed. New York: AIChE.
- Al Seadi, Teodorita; Rutz, Dominik; Prassl, Heinz; Köttner, Michael; Finsterwalder, Tobias; Volk, Silke; Janssen, Rainer. 2008. *Biogas Handbook*. Esbjerg, Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg.
- Antweiler, R. C., Goolsby, D. A. & Taylor, H. E., 1995. *Nutrients in the Mississippi river. Report No. 1133.*, Reston, VA, USA: U.S.: Geological Survey..
- Asconumatics, 2012. *Emerson Industrial Automation*. [En línea] Disponible en: <http://www.asconumatics.eu/es/sectores-industriales/ambientes-explosivos.html> [Último acceso: Enero 2014].
- Asveld, L. & Roeser, S., 2009. *The ethics of technological risk*. First ed. London, UK: Earthscan.
- BADESNIARN, 2012. *Residuos sólidos urbanos*. [En línea] Disponible en: [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/Compendio\\_2012/mce\\_index.html](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/Compendio_2012/mce_index.html) [Último acceso: Enero 2014].
- BID, 1997. *Guía para la evaluación de impacto ambiental para proyectos de residuos sólidos municipales. Procedimientos Básicos.*, s.l.: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Braber, K., 1995. Anaerobic digestion of municipal solid waste: A modern waste disposal option on the verge of breakthrough. *Biomass and Bioenergy*, 9(1-5), pp. 365-376.
- Bradfer, J.-F., 2002. *Riesgos y Seguridad en el manejo del biogás en una planta de tratamiento de aguas servidas.*, Cancún, México: XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental..





Cakir, F. Y. & S. M. K., 2005. Greenhouse gas production: A comparison between aerobic and anaerobic wastewater treatment technology.. *Water Research*, 39(17), pp. 4197-4203.

Casal Fàbrega, J. & Vilchez Sánchez, J. A., 2010. El riesgo químico y el territorio. *Revista Catalana de Seguridad Pública*, Issue 23, pp. 127-154.

Cavinato, Cristina., 2011. *Anaerobic Digestion Fundamentals I*, s.l.: s.n. Dipartimento di Scienze Ambientali Informatica e Statistica. Università Ca' Foscari Venezia

CCPS, 1989. *Guidelines for chemical Process Quantitative Risk Analysis*. New York: Center for Chemical Process Safety (CCPS); AIChE (American Institute of Chemical Engineers).

Chugh, S.; Chynoweth, D. P.; Clarke, W.; Pullammanappallil, P.; Rudolph, V. 1999. Degradation of unsorted municipal solid waste by a leach-bed process.. *Bioresource Technology*, 69(2), p. 103–115.

Conesa Fernández, V., 1997. *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental*. Tercera ed. Madrid: Mundi-Prensa.

Cuentas Alvarado, M. S., 2009. *Evaluación cualitativa del impacto ambiental generado por la actividad minera en La Rinconada Puno*, Piura: Universidad de Piura.

De Hullu, J.; Maassen, J.I.W.; Van Meel, P.A.; Shazad, S.; Vaessen, J.M.P. 2008. *Comparing different biogas upgrading techniques*, Eindhoven: Eindhoven University of Technology.

Dee, Norbert; Baker, Janet ; Drobny, Neil; Duke, Ken ; Whitman, Ira; Fahringer, Dave. 1973. An environmental evaluation system for water resource planning. *Water resources research* , 9(3), pp. 524-535.

Delgadillo Ubaldo, E., 2008. *Metodología para el análisis de riesgos ambientales. Impacto social en la población del municipio de Ecatepec, Estado de México*. México, D.F.: IPN.

DESA/UFMG, 1995. *Manual de Saneamento e Proteção ambiental para os municípios*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental ((DESA/UFMG). Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM/MG)

Deublein, D. & Steinhauser, A., 2008. *Biogas from Waste and Renewable Resources*. Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

DGIRA, 2011. *Impacto ambiental: definición y objetivo*. [En línea] Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/impactoambiental/Paginas/evaluacion.aspx>

[Último acceso: Noviembre 2012].





DGIRA, 2012. *Impacto Ambiental y Tipos*. [En línea]

Disponible en:

<http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/impactoambiental/Paginas/impactoambiental.aspx>

[Último acceso: Noviembre 2012].

DGIRA-SEMARNAT, 2002. *Guía para la presentación de la manifestación de impacto ambiental, cambio de uso de suelo o proyectos agropecuarios, modalidad particular.*, México, D.F.: SEMARNAT.

DGPCE, 2012. *Dirección General de Protección Civil y Emergencias*. [En línea]

Disponible en: <http://www.proteccioncivil.org/riesgos>

[Último acceso: Septiembre 2012].

Dimpl, E., 2010. *Small-scale Electricity Generation from Biomass Part II: Biogas*, s.l.: GTZ-HERA.

DOF, 1990. Primer LAAR. Primer Listado de Actividades Altamente Riesgosas. *Diario Oficial de la Federación*, 28 marzo.

DOF, 1992. Segundo LAAR. Primer Listado de Actividades Altamente Riesgosas. *Diario Oficial de la Federación*, 4 mayo.

DOF, 2013. *Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*, México, D.F., a 24 de Mayo de 2013 (Última reforma publicada en el DOF) : Diario Oficial de la Federación.

DOF, 2013. *Ley General para la Prevención y la Gestión Integral de los Residuos*, México, D.F., 7 de Junio de 2013 (Última reforma publicada en el DOF): Diario Oficial de la Federación.

Domingo, R., 2009. La pirámide del derecho global / The legal pyramid of Global Law. *Persona y Derecho*, Issue 60, pp. 29-61.

ECN, 2011. *Country Report of Norway*. [En línea]

Disponible en: <http://www.compostnetwork.info/norway.html>

[Último acceso: Agosto 2012].

Edwards, R., Smith, K., Zhang, J. & Ma, Y., 2004. Implications of changes in household stoves and fuel use in China.. *Energy Policy*, pp. 395-411..

EFM, 2013. *Environmental Fabrica de Mexico*. [En línea]

Disponible en: <http://www.efdemexico.com/>

[Último acceso: Septiembre 2012].

Eliyan, C., 2007. *Anaerobic digestion of municipal solid waste in thermophilic continuous operation*. Asian Institute of Technology School of Environment. Thailand





EPA, 1994. *Flammable gases and liquids and their hazards*, Washington, D.C.: Office of Pollution Prevention and Toxics U.S. Environmental Protection Agency.

EPA, 2009. *Introduction to Anaerobic Digester Biogas Systems*. [En línea]

Disponible en: [www.epa.gov/agstar](http://www.epa.gov/agstar)

[Último acceso: Septiembre 2012].

Espinoza, G., 2002. *Gestión y Fundamentos de Evaluación de Impacto Ambiental*. Santiago, Chile: BID (Banco Interamericano de Desarrollo). CED (Centro de Estudios para el Desarrollo)..

Felix, A., Sánchez, S. & Mandujano, M. I., 1979. *Estudios de adaptación y pruebas de equipos comerciales para la utilización de biogás*. Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Fernández, A., Sánchez, A. & Font, X., 2005. Anaerobic co-digestion of a simulated organic fraction of municipal solid wastes and fats of animal and vegetable origin. *Biochemical Engineering Journal*, Volumen 26, pp. 22-28.

Flores Hernández, J. L., 2006. *Análisis de Seguridad y Salud en el Trabajo y Propuestas de Solución en el Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra*. Pachuca de Soto, Hidalgo. : Instituto de Ciencias básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

Frigon , J. C. & Guiot, S. R., 2010. Biomethane production from starch and lignocellulosic crops: a comparative review.. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(4), pp. 447-58.

Gasca Alvarez , S., 2012. *Proyectos Emblemáticos: "Bio Cancun" Plan de Manejo de Autos Usados al Final de su Vida Útil*, Ciudad de México: SEMARNAT .

GDF, 2010. (PGIRSDF) Programa de Gestión Integral de los Residuos Sólidos el Distrito Federal. *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, 13 09, XVII(925), pp. 13-71.

GTZ/EnDev, 2010. *Installation manual for low-cost polyethylene tube digesters*, Germany: GTZ.

Hadjibiros, D., Dermatas, C. S. & Laspidou, K., 2011. Municipal solid waste management and landfill site selection in Greece: Irrationally versus Efficiency. *Global NEST Journal*, 13(2), pp. 150-161.

Hartmann, H., Møller, . H. B. & Ahring, B. K., 2002. *Anaerobic treatment of the organic fraction of municipal solid waste in Denmark*, Lyngby, Denmark: The Environmental Microbiology/Biotechnology Research Group.

IEA, 2001. *Biogas and more: Systems and Markets Overview of Anaerobic digestion*, Culham, Abingdon, Oxfordshire, UK: AEA Technology Environment. Agencia Internacional de Energía.





IIAR, 2010. Coleccionable de Toxicología. Sulfuro de hidrógeno. *SEGURIIAR*, 8(87), pp. 12-19. Instituto Internacional de Administración de Riesgos.

INE, S., 2000. *¿Qué es el Instituto Nacional de Ecología?*. México, D.F.: INE - SEMARNAP. Instituto Nacional de Ecología

INECC, 2012. *Diagnostico básico de los residuos 2012*, Ciudad de México: SEMARNAT/INE. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

INEGI, 2010. *Población, hogares y vivienda*. [En línea] Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/sisept/Default.aspx?t=mdemo148&s=est&c=29192> [Último acceso: Agosto 2012].

INEGI, 2012. *Residuos Sólidos Urbanos*, Ciudad de México: INEGI.

INE-SEMARNAP, 1999. *Promoción de la prevención de accidentes químicos*. Primera ed. México, D.F.: INE.

INFRA, 2012. *Servicio y atención al cliente: Infra*. [En línea] Disponible en: [http://www.infra.com.mx/servicio\\_atencion/libreria/gases/documentos/msds/metano.pdf](http://www.infra.com.mx/servicio_atencion/libreria/gases/documentos/msds/metano.pdf)

InSource Energy, 2010. *Use of Digestate from Anaerobic Digestion as agricultural fertiliser*. [En línea] Disponible en: [www.insource-energy.co.uk](http://www.insource-energy.co.uk) [Último acceso: Septiembre 2012].

IVHHN, 2012. International Volcanic Health Hazard Network. [En línea] Disponible en: [http://ivhhn.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=122](http://ivhhn.org/index.php?option=com_content&view=article&id=122)

Jonsson, H., Stintzing, A. R., Vinneras, B. & Salomon, E., 2004. *Guidelines on the use of urine and faeces in crop production. Report No. 2004-2.*, Stockholm, Sweden: Stockholm Environment Institute..

Kandlikar, M., Reynolds, C. & Grieshop, A., 2011. *Copenhagen Consensus Center: Frederiksberg, Denmark.* [En línea] Disponible en: [http://fixthecclimate.com/uploads/tx\\_templavoila/PP\\_Black\\_Carbon\\_Kandlikar\\_Reyn](http://fixthecclimate.com/uploads/tx_templavoila/PP_Black_Carbon_Kandlikar_Reyn)

Kocak- Enturk, E., Yetilmezsoy, K. & Ozturk, M., 2007. A small-scale biogas digester model for hen manure treatment: evaluation and suggestions.. *Frensus Environmental Bulletin*, 16(7), pp. 804-811..

Kolluru, R. V., Bartell, S. M., Pitblado, R. M. & Stricoff, R. S., 1998. *Manual de Evaluación y Administración de Riesgos*. México: McGraw-Hill.

Lapping, M. B., 1975. Environmental Impact Assessment Methodologies: A Critique. *Boston College Environmental Affairs Law Review*, 4(1), pp. 123-134.

León Peláez, J. D., 2001. *Evaluación de impacto ambiental de proyectos de desarrollo*, s.l.: s.n.





Leopold, L. B., Clarke, F. E., Hanshaw, B. B. & Balsley, J. R., 1971. *A Procedure for Evaluating Environmental Impact.*, Washington, D.C: U.S. Geological Survey Circular 645.

Liebetrau, J., Kraft, E. & Bidlingmaier, W., 2002. *Anaerobic digestion in germany – perspectives of innovations for the coming decade*, Weimar, Germany: Bauhaus-University Weimar. Department of Waste Management.

Lo Níe, L., Jian, S. & Yebo, L., 2012. Methane production from solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. *Biomass and Bioenergy*, Volumen 46, pp. 125-132.

Lobera Lössel, J. B., 2011. *Historia del Biogás*, s.l.: IMIDA.

López M, M. E., 2001. *Evaluación de impacto ambiental: Metodología y alcances – El método MEL-ENEL*, San José, C.R.: ICAP.

Mara, D. & Cairncross, S., 1989. *Guidelines for the safe use of wastewater and excreta in agriculture and aquaculture: Measures for public health protection.*, s.l.: World Health Organization..

Mata-Alvarez, J., Mace, S. & Llabres, P., 2000. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresources Technology*, 74(1), pp. 3-16.

McCarty, P. L., 1964. Anaerobic waste treatment fundamentals.. *Public Works*,, 95(9-12), pp. 107-112..

McCarty, P., 2001. The development of anaerobic treatment and its future. *Water Science & Technology*, 44(8), p. 149–156.

MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011. *Manual de Biogás*. Santiago de Chile: FAO.

Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino, 2010. *El sector del biogás agroindustrial en España*, Madrid : Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino.

Modarres, M., 2006. *Risk analysis in engineering. Techniques, tools and trends*. Primera ed. Boca Raton, Florida. US: Taylor & Francis Group.

NAS, 1983. *Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process.*, Washington D.C.: National Academy Press.

Novelo Burbante, F., 1995. Impacto y riesgo ambiental en la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. *Revista de Administración Pública. Administración ecológica.*, Issue 87, pp. 93-98.

Nyns, E. J. & Gendebien, . A., 1992. *Landfill gas: from environment to energy.*, Venice, Italy: F. Cecchi, J. Mata-Alvarez, and F. G. Pohland (eds.),.

OSHA, 2012. *Administración de Seguridad y Salud Ocupacional Departamento del Trabajo de EE.UU.*. [En línea] Disponible en: [www.osha.gov](http://www.osha.gov)





Palacios González, S., 2011. *Propuesta Tecnológica para la valorización de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos generados en el Distrito Federal*. México, D.F.: Facultad de Química, UNAM..

PEMEX, 2008. *NRF-018-PEMEX-2007*. s.l.:PEMEX.

PMI, 2008. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge*. Cuarta ed. Pennsylvania, USA: Project Management Institute, Inc..

Ponce, V. M., 2011. *The Batelle Environmental Evaluation System for Water Resource Planning*. [En línea] Disponible en: [http://ponce.sdsu.edu/the\\_battelle\\_ees.html](http://ponce.sdsu.edu/the_battelle_ees.html) [Último acceso: Octubre 2012].

Ponce, V. M., 2011. *The Leopold matrix for evaluating environmental impact*. [En línea] Available at: [http://ponce.sdsu.edu/the\\_leopold\\_matrix.html](http://ponce.sdsu.edu/the_leopold_matrix.html) [Último acceso: Octubre 2012].

Ramírez, O. J., 2009. Riesgos de origen tecnológico: Apuntes conceptuales para una definición, caracterización y reconocimiento de las perspectivas de estudio del riesgo tecnológico. *Revista Luna Azul*, Issue 29, pp. 82-94.

Ramos Soberanis, A. N., 2004. *Metodologías matriciales de evaluación ambiental para países en desarrollo: Matriz de Leopold y Método MEL-ENEL*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería..

Rapport, J., Zhang, R., Jenkins, B. M. & Williams, R. B., 2008. *Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste*, s.l.: California Environmental Protection Agency.

Rittmann, B. E. & McCarty, P. L., 2001. *Environmental biotechnology: Principles and applications*. Singapore: McGraw Hill..

Rivera Sánchez, G., 2005. *Diagnóstico de la problemática de los residuos sólidos urbanos en el municipio de Ciudad Ixtepec, Oaxaca*, Puerto Ángel, Oaxaca: Universidad del Mar.

Romano Pardo, M. d. L., 2010. *Evaluación Conceptual del impacto Ambiental de la Gasificación de Residuos sólidos Urbanos en el Distrito Federal*. México D.F.: Facultad de Química, UNAM..

Rowse, L. E., 2011. *Design of Small Scale Anaerobic Digesters for Application in Rural Developing Countries*, s.l.: University of South Florida.

Santamaría Ramiro, J. M. & Braña Aísa, P. A., 1998. *Risk Analysis and Reduction in Chemical Process Industry*. First ed. London: Blackie A & P an imprint of Thompson Science.

SASIPA, PEMEX-REFINACIÓN, 2011. *Guía para análisis de riesgos*. DG-SASIPA-SI-02741, México, D.F.: PEMEX-REFINACIÓN.





Schnürer, A. & Jarvis, Å., 2009. *Microbiological Handbook for Biogas Plants*. Swedish: Swedish Gas Centre (SGC).

SEDUE, 1986. *Informe sobre el estado del medio ambiente en México*, México, D.F.: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología / Fundación Arturo Rosenblueth, A.C..

SEMARNAP-INE, 2000. *La Evaluación del Impacto ambiental Logros y Retos para el Desarrollo Sustentable 1995-2000*. Primera ed. México, D.F.: SEMARNAP-INE.

SEMARNAT, 2008. *Programa Nacional para la gestión Integral de los Residuos (PNGIR) 2009-2012*, México, D.F.: SEMARNAT.

SEMARNAT, 2011. *Materiales y Actividades Riesgosas*. [En línea] Disponible en: <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestionambiental/materialesactividades/aar/diag-er.JPG>  
[Último acceso: Octubre 2012].

SEMARNAT/SAGARPA, 2010. *Especificaciones Técnicas para el diseño y construcción de biodigestores en México*, México: SEMARNAT/SAGARPA.

Sharma, N. & Pellizzi, G., 1991. Anaerobic biotechnology and developing-countries: 1.. *Energy Conversion and Management*, 35(5), pp. 447-469..

SMA, 2008. *Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 2008*, México, D.F.: Gobierno del Distrito Federal. Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal.

SMA, 2009. *Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 2009*, México, D.F.: Gobierno del Distrito Federal. Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal.

SMA, 2010. *Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 2010*, México, D.F.: Gobierno del Distrito Federal. Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal.

SMA, 2011. *Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 2011*, México, D.F.: Gobierno del Distrito Federal. Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal.

SMA, 2012. *Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 2012*, México, D.F.: Gobierno del Distrito Federal. Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal.

Smil, V., 1999. Nitrogen in crop production: An account of global flows.. *Global Biogeochemical Cycles*, 13(2), pp. 647-662..

Speece, R. E., 1996. *Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters*. Nashville, TN, USA: Archae Press.

Tchobanoglous, G., Burton, F. L. & Stensel, H. D., 2003. *Wastewater*. New York, NY: McGraw Hill.

Texta, José Agustín., 2011. *Apuntes de Administración de Proyectos*.





Trzcinski, A. P., 2009. *Anaerobic Membrane Bioreactor Technology for Solid Waste Stabilization*, London: Imperial College London.

U.S. EPA, 2006. *Global Anthropogenic Emissions of Non-CO2 Greenhouse Gases: 1990–2020*. [En línea] Disponible en:

<http://www.epa.gov/climatechange/economics/downloads/GlobalAnthroEmissionsReport.pdf>

[Último acceso: Octubre 2012].

UNISDR, 2009. *Terminología sobre reducción de riesgo de desastres*. Segunda ed. Ginebra, Suiza: UNISDR-ONU. United Nations International Strategy for Disaster Reduction.

Vandevivere, P., De Baere, L. & Verstraete, W., 2004. Types of anaerobic digesters for solid wastes. En: *Biomethanization of OFMSW*. s.l.:s.n., pp. 1-31.

Vargas Hernández, J. M., 2003. La legislación mexicana en materia ambiental. En: *Memorias del primer encuentro internacional de derecho ambiental*. México, D.F.: SEMARNAT, p. 632.

Vesilind, P. A., 1998. *Wastewater treatment plant design*. London, UK and Alexandria, VA, USA: IWA Publishing and the Water Environment Federation. .

Warner, M. L. & Preston, E. H., 1974. *A review of environmental impact assessment methodologies*. EPA-600/5-74-002. Washington, D.C.: EPA U.S.

WHO, 2011. *Health statistics and health information systems: Global burden of disease..* [En línea] Disponible en: [http://www.who.int/healthinfo/global\\_burden\\_disease/en/](http://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/en/)





## 7.2 Anexos.

---

### **Anexo 1.** Siglas y acrónimos

AAE	Análisis de Árbol de Eventos
AAF	Análisis de Árbol de Fallas
AAR	Actividades Altamente Riesgosas
AAS	Análisis de Árbol de Sucesos
AHR	Análisis Histórico de Riesgos
AIChE	American Institute of Chemical Engineers
APR/PHA	Análisis Preliminar de Riesgo /Preliminar Hazard Analysis
BADESNIARN	Base de Datos Estadísticos del Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion" (explosión de vapores que se expanden al hervir el líquido)
CCPS	Center for Chemical Process Safety
COT	Contenido Orgánico Total
CRETIB	Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico, Inflamable y Biológico Infeccioso
DA	Digestión Anaerobia
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DGGIMAR	Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas
DGIRA	Dirección General de Impacto y Riesgo Ambiental
DOF	Diario Oficial de la Federación
DQO	Demanda Química de Oxígeno
ECN	European Compost Network.
EFM	Environmental Fabrics de México





EIA	Evaluación de Impacto Ambiental
EPA	Environmental Protection Agency
ERA	Evaluación de Riesgo Ambiental
FORSU	Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos
GDF	Gobierno del Distrito Federal
IIAR	Instituto Internacional de Administración de Riesgos.
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IVHHN	International Volcanic Health Hazard Network.
LAAR	Listado de Actividades Altamente Riesgosas
LADF	Ley Ambiental del Distrito Federal
LFMN	Ley Federal de Metrología y Normalización
LFT	Ley Federal del Trabajo
LGEEPA	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
LGPGIR	Ley General de Prevención y Gestión Integral de los Residuos
LGS	Ley General de Salud
LRSDF	Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal
NMX	Norma Mexicana
NOM	Norma Oficial Mexicana
NRF	Norma de Referencia
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
PET	Poli Etilén Tereftalato
PMI	Project Management Institute
PPA	Programa de Prevención de Accidentes
RS	Residuos Sólidos
RSM	Residuos Sólidos Municipales





RSO	Residuos Sólidos Orgánicos
RSOM	Residuos Sólidos Orgánicos Municipales
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SEMARNAT	Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENER	Secretaría de Energía
SNIARN	Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales
SRT	Solid Retention Time (tiempo de retención de sólidos)
SSA	Secretaría de salubridad y Asistencia
STPS	Secretaría del Trabajo y Prevención Social.





## **Anexo 2.** Normas Oficiales Mexicanas

Enseguida se enuncian las normas oficiales mexicanas de la Tabla 11.

Emitidas por la SEMARNAT:

- NOM-001-SEMARNAT-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
- NOM-002-SEMARNAT-1996. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
- NOM-003-SEMARNAT-1997. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.
- NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.
- NOM-043-SEMARNAT-1993. Establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de partículas sólidas provenientes de fuentes fijas.
- NOM-052-SEMARNAT-2005. Establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
- NOM-081-SEMARNAT-1994. Establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición.
- NOM-083-SEMARNAT-2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y manejo especial.





- NOM-085-SEMARNAT-1994. Contaminación atmosférica. Fuentes fijas. Para fuentes fijas que utilizan combustibles fósiles sólidos, líquidos o gaseosos o cualquiera de sus combinaciones, que establece los niveles máximos permisibles de emisión a la atmósfera de humos, partículas suspendidas totales, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno y los requisitos y condiciones para la operación de los equipos de calentamiento indirecto por combustión, así como los niveles máximos permisibles de emisión de bióxido de azufre en los equipos de calentamiento directo por combustión.

Emitidas por la STPS:

- NOM-002-STPS-2010. Relativa a las condiciones de seguridad para la prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo.
- NOM-004-STPS-1999. Sistemas de protección y dispositivos de seguridad en la maquinaria y equipo que se utilice en los centros de trabajo.
- NOM-005-STPS-1998. Relativa a las condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo para el manejo, transporte y almacenamiento de sustancias químicas peligrosas.
- NOM-010-STPS-1999. Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se manejen, transporten, procesen o almacenen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el medio ambiente local.
- NOM-011-STPS-2001. Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se genere ruido.
- NOM-017-STPS-2008. Equipo de protección personal. Selección, uso y manejo en los centros de trabajo.





- NOM-018-STPS-2000. Sistema para la identificación y comunicación de peligros y riesgos por sustancias químicas peligrosas en los centros de trabajo.
- NOM-021-STPS-1993. Relativa a los requerimientos y características de los informes de los riesgos de trabajo que ocurran, para integrar estadísticas.
- NOM-022-STPS-2008. Electricidad estática en los centros de trabajo. Condiciones de seguridad.
- NOM-026-STPS-2008. Colores y señales de seguridad e higiene, e identificación de riesgos por fluidos conducidos en tuberías.
- NOM-028-STPS-2004. Organización del trabajo. Seguridad en los procesos de sustancias químicas.
- NOM-029-STPS-2011. Mantenimiento de las instalaciones eléctricas en los centros de trabajo. Condiciones de seguridad.
- NOM-030-STPS-2009. Servicios preventivos de seguridad y salud en el trabajo. Funciones y actividades.
- NOM-031-STPS-2011. Construcción-Condiciones de seguridad y salud en el trabajo.

Emitidas por la SSA:

- NOM 048 NOM-048-SSA1-1993. Que establece el método normalizado para la evaluación de riesgos a la salud como consecuencia de agentes ambientales.

Emitidas por la SENER:

- NOM-001-SEDE-2005. Instalaciones eléctricas (utilización).
- NOM-003-SECRE-2002. Distribución de gas natural y gas licuado de petróleo por ductos.

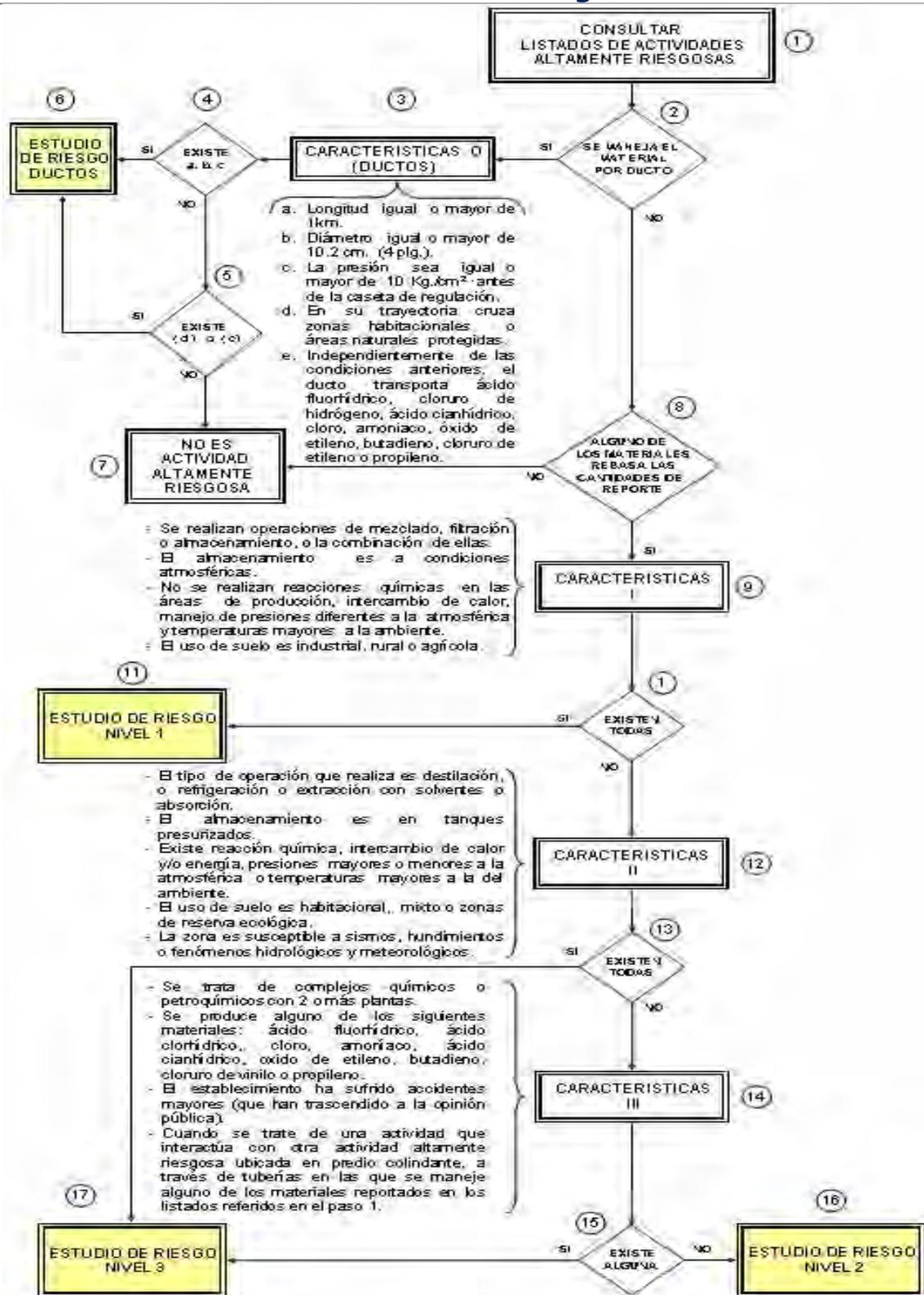
Emitidas por la SE

- NOM-008-SCFI-2002 Sistema general de unidades de medida





### Anexo 3. Guía para el análisis de riesgo de actividades altamente riesgosas



Fuente: (SEMARNAT, 2011)





### Anexo 4. Hojas de seguridad para las sustancias con características CRETIB, involucradas en el proceso de DA para el tratamiento de RSOM

Sulfuro de Hidrógeno			
Formula	Número CAS	Número UN/NA	Etiqueta para el transporte
H <sub>2</sub> S	7783-06-4	1053	Gas Tóxico Gas inflamable

#### NFPA 704

Diamante	Peligro	Valor	Descripción
	Salud	4	Puede ser letal
	Inflamabilidad	4	Se quema con facilidad. Rápida o completamente vaporiza a presión atmosférica y temperatura ambiente normal.
	Inestabilidad	0	Normalmente estable, incluso bajo condiciones de incendio.
	Especial		

(NFPA, 2010)

DESCRIPCIÓN GENERAL
Gas incoloro, con olor a huevo podrido. Gas irritante, tóxico, corrosivo, inflamable
RIESGOS DE FUEGO Y EXPLOSIÓN
El gas es más pesado que el aire y puede acumularse a poca altura (en áreas bajas y cerradas como sótanos) o desplazarse por encima de la superficie, en donde puede encontrarse con una fuente de ignición. puede producirse una re-ignición explosiva,
POTENCIALES EFECTOS ADVERSOS PARA LA SALUD
Concentraciones bajas – irritación de ojos, nariz, garganta o sistema respiratorio;
Concentraciones moderadas – efectos más severos en los ojos (puede provocar lesiones permanentes): lagrimeo, escozor, dolor en cuanto se mira a la luz (fotofobia) y vista borrosa; dolor de cabeza, mareos, náusea, tos, vómitos y dificultad al respirar; depresión pulmonar y parálisis respiratoria.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Concentraciones altas</b> – estado de shock, convulsiones, incapacidad para respirar, coma, muerte; los efectos pueden ser extremadamente rápidos (en pocos respiros). (OSHA, 2012)</li> </ul> La exposición intensa que no cause la muerte puede causar síntomas a largo plazo como pérdida de memoria, parálisis de músculos faciales o lesiones del tejido nervioso.





### PARÁMETROS DE EXPOSICIÓN

Valor límite de exposición: 10 ppm / durante un turno de 8 horas

Valor límite de exposición: 15 ppm / en periodos de 15 minutos

Referencia:

ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists

### INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

El sulfuro de hidrógeno está clasificado como cancerígeno o potencialmente cancerígeno por: OSHA, NTP, IARC

Concentración inmediatamente peligrosa para la vida y salud (IDLH): 100 ppm

OSHA: Occupational safety and health administration

NTP: National Toxicology Program

IARC: International Agency for Research on Cancer

IDLH: Immediately dangerous to life or health

### ECO-TOXICIDAD

En agua puede transformarse en anhídrido sulfuroso y en ácido sulfúrico causando cambios en el pH de los sistemas acuosos; dañinos para los peces.

### REACTIVIDAD Y ESTABILIDAD

Estabilidad	Incompatibilidad	Materiales Peligrosos de la Descomposición
Estable en condiciones normales.	<p>Es incompatible, en general, con oxidantes, bases fuertes y metales. (FQ, 2012)</p> <p>El sulfuro de hidrógeno es corrosivo con la mayoría de los metales, porque reacciona con estas sustancias para formar sulfuros metálicos.</p> <p>El sulfuro de hidrógeno puede explotar o entrar en combustión en un amplio rango de mezcla en el aire.</p>	Hidrógeno, vapores tóxicos de óxidos de azufre

### CONDICIONES A EVITAR

Evite que el gas entre en contacto con materiales incompatibles. Evite la exposición a calor, chispas u otras fuentes de ignición. Evite exponer los cilindros a altas temperaturas o llamas directas porque pueden romperse o estallar.

Referencias: (IIAR, 2010) (OSHA, 2012) (INFRA, 2012)





Metano			
Formula	Número CAS	Número UN/NA	Etiqueta para el transporte
CH <sub>4</sub>	74-82-8	1971	Gas inflamable

**NFPA 704**

Diamante	Peligro	Valor	Descripción
	Salud	2	Puede causar incapacidad temporal o daños residuales
	Inflamabilidad	4	Se quema con facilidad. Rápida o completamente vaporiza a presión atmosférica y temperatura ambiente normal.
	Inestabilidad	0	Normalmente estable, incluso bajo condiciones de incendio.
	Especial		

(NFPA, 2010)

DESCRIPCIÓN GENERAL	
<p>El metano es un gas incoloro e inodoro. También se conoce como gas de los pantanos o hidruro de metilo. Es muy susceptible a la ignición propia Los vapores son más ligeros que el aire. Se utiliza en la fabricación de otros productos químicos y como un constituyente del combustible, el gas natural y biogás</p>	
RIESGOS DE FUEGO Y EXPLOSIÓN	
<p>En la exposición prolongada al fuego o el calor intenso los contenedores pueden romperse violentamente.            Temperatura de Auto ignición 580 °C            METODO DE EXTINCIÓN: Polvo químico, CO<sub>2</sub> ó agua            Si la flama es extinguida y el flujo de gas continúa, incrementar la ventilación para prevenir la formación de una atmósfera inflamable o explosiva.</p>	
POTENCIALES EFECTOS ADVERSOS PARA LA SALUD	
<p>Inhalación: Altas concentraciones de metano ocasionan un suministro deficiente de oxígeno a los pulmones producirán mareos, respiración profunda debido a la necesidad de aire, posibles náuseas y la inconsciencia eventual.</p>	
PARÁMETROS DE EXPOSICIÓN	
<p>OSHA: Ninguno establecido.            ACGIH: Asfixiante simple.</p>	
INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA	
<p>El metano es inactivo biológicamente y esencialmente no es tóxico; por lo tanto, el mayor riesgo de sobreexposición es la no admisión de un suministro adecuado de oxígeno a los pulmones.            El metano no está clasificado como cancerígeno o potencialmente cancerígeno por NTP, IARC ni OSHA</p>	
REACTIVIDAD Y ESTABILIDAD	
Estabilidad	Incompatibilidad
Estable en condiciones normales.	Forma mezclas explosivas o inflamables con la mayoría de los agentes oxidantes (oxígeno, cloro, flúor) y es inflamable en aire en un amplio rango.
REFERENCIA	
(IIAR, 2010) (OSHA, 2012) (INFRA, 2012)	





### Anexo 5. Guía de Trámites principales para el desarrollo de proyectos a partir de Tecnologías para biogás, biomasa y cogeneración eficiente. Adaptado de (SEMARNAT)

