



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

PRE-FACTIBILIDAD DE UNA PLANTA DE  
TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS  
URBANOS EN EL PUERTO DE VERACRUZ

**TESIS**

Que para obtener el título de:

INGENIERO INDUSTRIAL

Presenta:

RUBÉN JAHIR MOJICA HERNÁNDEZ

Directora de tesis:

DRA. ALEJANDRA CASTRO GONZÁLEZ



**JURADO ASIGNADO**

**PRESIDENTE:** M. en I. Bernardo Frontana de la Cruz

**VOCAL:** Dra. Alejandra Castro González

**SECRETARIO:** Dr. Arturo Guillermo Reinking Cejudo

**1er. SUPLENTE:** Ing. Ángel Leonardo Bañuelos Saucedo

**2do. SUPLENTE:** M. en I. Tanya Moreno Coronado

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. El trabajo forma parte del programa PAPIIME PE100810 como contribución teórica para la formación de nuevas generaciones en ingeniería en el tema sobre prototipos de bioenergía con diferentes tipos de desechos.

**ASESORA DEL TEMA:**  
Dra. Alejandra Castro González

\_\_\_\_\_

**SUSTENTANTE:**  
Rubén Jahir Mojica Hernández

\_\_\_\_\_

## AGRADECIMIENTOS

*A mi madre... que me ha enseñado, no sólo con palabras y consejos sino con el ejemplo vivo, que en esta vida nada es sencillo, que para salir avante de un problema antes que cualquier otra cosa se necesita valor, compromiso y entrega total y que a veces vale la pena sacrificar nuestra propia felicidad con tal de ver sonreír a alguien más.*

*A mi padre... por cimentar los valores sobre los que reposa ligeramente mi formación profesional y por enseñarme que la disciplina lo es todo cuando se quiere ser grande.*

*A mi tío Antonio Hernández...por fungir de guía, apoyo, ejemplo y amigo en mi desarrollo profesional.*

*A mi UNAM... por darme herramientas para enfrentar con entereza los embates de la vida profesional y por inundar mi cabeza con la idea de que México puede ser un país campeón y que nosotros, sus egresados, tenemos que ser los responsables de que eso suceda.*

*A la Facultad de Ingeniería... por brindarme el honor de alojarme en sus prestigiosas aulas y contagiarme de su compromiso con el país.*

*A la Dra. Alejandra... por convertir esta tesis en un reto tan grande como distinguido.*

*A mis incondicionales amigos Carlos, Nelly, Iván, Fernando, Marisa y Abraham... por el gran apoyo que me brindaron durante la realización de esta tesis y como compañeros de la aventura más grande de mi vida.*

*A mis sinodales... Bernando Frontana, Leonardo Bañuelos, Arturo Reinking y Tanya Moreno por sus valiosos comentarios y el tiempo que invirtieron al revisar este trabajo.*

# ÍNDICE

ÍNDICE DE CONTENIDOS	I
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABLAS	IV
NOMENCLATURA	VI
RESUMEN	VII
INTRODUCCIÓN	VII
OBJETIVO GENERAL	X
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	X
<b>CAPÍTULO 1</b>	
ANTECEDENTES	1
1.1 Energías renovables y cambio climático	1
1.2 Biomasa	4
1.2.1 Procesos de conversión de la biomasa	6
1.3 Residuos sólidos urbanos (RSU)	7
1.3.1 Composición de los residuos	9
1.3.2 Problemas asociados con un mal manejo de los residuos	10
1.4 Gestión y manejo de los residuos sólidos	13
1.4.1 Tratamientos comunes para los residuos sólidos urbanos	14
1.4.2 Rellenos sanitarios	17
<b>CAPÍTULO 2</b>	21
FUNDAMENTOS	
2.1 Digestores	21
2.2 Experiencias internacionales y nacionales	26
2.3 Factores para el diseño y operación de una planta de biogás	27
2.4 Diseño de plantas de biogás	31
2.5 Pre-tratamientos para la digestión de residuos sólidos urbanos	38
2.5.1 Selección y separación previa	38
2.5.2 Trituración	41
2.5.3 Procesos de pre-tratamiento combinados	41
2.6 Uso de lodos digeridos	43
2.7 Purificación de biogás para su uso como combustible vehicular	49
2.8 Evaluación financiera de proyectos de inversión	58
2.9 Protocolo de Kioto	62
2.10 Mecanismos de desarrollo limpio (MDL)	63
2.11 Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética	64
2.12 Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos	64
2.13 Normas Oficiales Mexicanas	65
2.14 Análisis ambiental de un proyecto	66

<b>CAPÍTULO 3</b>	67
ESTUDIO DE CASO	
3.1 Elección del sitio para propuesta de planta de biogás	69
3.2 Metodología para el diseño de la planta de biogás	73
3.3 Procesos y tecnologías a emplear en la planta de biogás	74
<b>CAPÍTULO 4</b>	76
EVALUACIÓN Y RESULTADOS	
4.1 Pre-factibilidad técnica	76
4.1.1 Dimensionamiento de los procesos y memoria de cálculo	76
4.1.1.1 Selección y separación de inorgánicos	76
4.1.1.2 Trituración de orgánicos	77
4.1.1.3 Dilución	78
4.1.1.4 Parámetros de digestión	80
4.1.1.5 Generación y adecuación de biogás	81
4.1.1.6 Sistema de calefacción	82
4.1.1.7 Sistema de generación de energía	84
4.1.1.8 Utilización del biogás como combustible vehicular	86
4.1.1.9 Uso de lodos digeridos como mejoradores de suelo	90
4.1.1.10 Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero	96
4.1.2 Diseño y distribución de planta	100
4.1.3 Resumen de datos y valoración técnica	103
4.2 Pe-factibilidad financiera	
4.2.1 Inversión inicial fija	107
4.2.2 Inversión inicial diferida	109
4.2.3 Inversión circulante	109
4.2.4 Presupuestos de egresos	109
4.2.5 Presupuestos de ingresos	113
4.2.6 Estado de resultados	120
4.2.7 Tasa interna de retorno (TIR)	122
4.2.8 Tasa mínima de rendimiento atractiva (TMRA)	123
4.2.9 Valor presente neto	124
4.2.10 Periodo de recuperación de la inversión	125
4.3 Pre-factibilidad ambiental	125
4.3.1 Reducción de gases de efecto invernadero	125
4.3.2 Reducción de la contaminación de mantos freáticos	126
4.3.3 Agua de riego	127
4.3.4 Reducción de riesgos sanitarios	127
4.3.5 Reciclaje	127
4.4 Pre-factibilidad social	128
4.4.1 Índice beneficio-costo	128
4.4.2 Justificación del proyecto y beneficios sociales	128
<b>CAPÍTULO 5</b>	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	129
5.1 Conclusiones	129
5.2 Discusión y recomendaciones	130
<b>REFERENCIAS</b>	132

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Concentración atmosférica en partes por millón y partes por billón de los gases de efecto invernadero a través del tiempo	2
Figura 1.2	El efecto invernadero	2
Figura 1.3	Aumento de la temperatura anual promedio	3
Figura 1.4	Aumento del nivel del mar en Veracruz	4
Figura 1.5	Número de incendios forestales en México	4
Figura 1.6	Generación de residuos per cápita a nivel mundial	9
Figura 1.7	Generación de residuos sólidos urbanos por zona	10
Figura 1.8	Generación por tipo de residuos sólidos urbanos	11
Figura 1.9	Modelo de manejo integral de los residuos sólidos urbanos	13
Figura 1.10	Disposición de residuos en México	18
Figura 1.11	Preparación de un sitio de disposición	19
Figura 2.1	Etapas del proceso de tratamiento anaerobio	22
Figura 2.2	Clasificación general de los digestores	23
Figura 2.3	Digestor horizontal	24
Figura 2.4	Flujo esquemático de digestores para el tratamiento de desechos	24
Figura 2.5	Digestor completamente mezclado	25
Figura 2.6	Distribución de operaciones unitarias en un digestor de dos etapas	26
Figura 2.7	Variación de los principales parámetros del tratamiento anaerobio	28
Figura 2.8	Producción de biogás de diferentes sustratos	32
Figura 2.9	Producción de biogás en función de diferentes moléculas orgánicas	32
Figura 2.10	Personal en una planta de selección manual	39
Figura 2.11	Ejemplo de un trommel de dos etapas	40
Figura 2.12	Sistema BTA® de pre-tratamiento hidromecánico	42
Figura 2.13	Diagrama de proceso de tratamiento de ArrowBio®	43
Figura 2.14	Agua contenida en los lodos digeridos	44
Figura 2.15	Volumen de lodos digeridos versus contenido de humedad	45
Figura 2.16	Proceso general en una estación de depuración de aguas residuales	45
Figura 2.17	Zonas en un sedimentador	47
Figura 2.18	Esquema de filtro prensa	48
Figura 2.19	Esquema de un filtro banda convencional	49
Figura 2.20	Reducción de emisiones contaminantes respecto a la gasolina	51
Figura 2.21	Comparación de emisiones de diferentes biocombustibles	52
Figura 2.22	Rendimiento por Ha de diferentes biocombustibles	53
Figura 2.23	Esquema de una estación de llenado rápido de gas natural para automóviles	56
Figura 2.24	Tráiler para transportar bancos de gas natural	56
Figura 2.25	Componentes de un sistema de conversión a metano en el automóvil	58
Figura 3.1	Promedio de temperaturas de los últimos años en el Puerto de Veracruz	68
Figura 3.2	Imagen satelital del Puerto de Veracruz con mercados	71

Figura 3.3	Ubicación de los mercados del puerto en un plano cartesiano	71
Figura 3.4	Representación de la distancia como la magnitud de un vector	72
Figura 3.5	Ubicación de planta de biogás	73
Figura 3.6	Terreno para la ubicación de la planta de biogás	73
Figura 3.7	Diagrama de proceso propuesto para la planta de biogás	75
Figura 4.1	Modelo de aislamiento térmico de digestor	83
Figura 4.2	Módulos de almacenamiento de gas natural	87
Figura 4.3	Surtidor de gas natural	89
Figura 4.4	Envasadora electrónica para granulados	96
Figura 4.5	Propuesta para la distribución de la planta de biogás	102
Figura 4.6	Antorchas para la quema de biogás	105
Figura 4.7	Estructura de costos de la planta de biogás	113
Figura 4.8	Ingresos promedio por la venta de reciclables	115
Figura 4.9	Ingresos por la venta de gas metano comprimido	115
Figura 4.10	Incremento del precio del petróleo en los próximos años	116
Figura 4.11	Tipo de cambio proyectado para los próximos años	116
Figura 4.12	Incremento porcentual en el precio de los fertilizantes químicos	116
Figura 4.13	Ingresos por la venta de fertilizante	117
Figura 4.14	Ingresos por la venta de certificados de reducción de emisiones	118
Figura 4.15	Ingresos totales generados por el proyecto	119
Figura 4.16	Generación de ingresos por tipo	119
Figura 4.17	Porcentaje que representa la utilidad bruta	121
Figura 4.18	Porcentaje que representa la utilidad antes de impuestos	121
Figura 4.19	Porcentaje que representa la utilidad neta	121
Figura 4.20	Flujos netos de efectivo del proyecto	123
Figura 4.21	Flujo neto acumulado a valor presente	125

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Problemas asociados a la falta de manejo de los residuos	11
Tabla 1.2	Enfermedades provocadas por la fauna nociva de los residuos	12
Tabla 2.1	Valores mínimos de parámetros físicos y químicos para la degradación anaerobia de desechos sólidos municipales	29
Tabla 2.2	Carga orgánica de los residuos líquidos de diversos procesos de la industria de hortalizas	30
Tabla 2.3	Carga orgánica de los residuos líquidos de diversos procesos de la industria frutera	30
Tabla 2.4	Producción de biogás de diferentes tipos de biomasa	34
Tabla 2.5	Producción de biogás y metano de varios sustratos a un tiempo de retención de 20 días y una temperatura de 30°C	35
Tabla 2.6	Producción de biogás y gas metano de diferentes co-sustratos	36
Tabla 2.7	Producción de biogás de varios tipos de biomasa	37

Tabla 2.8	Coefficiente de distribución de varios componentes del biogás	38
Tabla 3.1	Resultado para la elección de lugar para la planta de biogás	70
Tabla 4.1	Modelos de plantas de selección de residuos	76
Tabla 4.2	Aislantes y valores típicos de conductividad térmica (k)	83
Tabla 4.3	Requerimientos energéticos de equipos necesarios para la planta	85
Tabla 4.4	Módulos de cogeneración con motor PASCH a biogás	85
Tabla 4.5	Características técnicas de equipos de compresión para gas natural	87
Tabla 4.6	Concentraciones máximas permisibles en espesadores de diferentes tipos de lodos	92
Tabla 4.7	Dimensiones de filtros-prensa más comunes	94
Tabla 4.8	Dimensiones generales de filtros banda para diferentes lodos	95
Tabla 4.9	Emisión de CO <sub>2</sub> por tipo de vehículo	97
Tabla 4.10	Características del sustrato	103
Tabla 4.11	Potencial de los residuos para generar biogás	103
Tabla 4.12	Parámetros para el proceso	103
Tabla 4.13	Resumen de las dimensiones del digestor	104
Tabla 4.14	Resumen de las dimensiones del tanque de alimentación	104
Tabla 4.15	Producción diaria de biogás	104
Tabla 4.16	Alternativa para el almacenamiento antes de la purificación	104
Tabla 4.17	Consideraciones para la purificación	105
Tabla 4.18	Energía térmica necesaria para el proceso	105
Tabla 4.19	Producción de energía eléctrica a partir de la planta de biogás	106
Tabla 4.20	Acondicionamiento de lodos	106
Tabla 4.21	Primera parte de los activos fijos necesarios en planta	107
Tabla 4.22	Segunda parte de los activos fijos necesarios en planta	108
Tabla 4.23	Activos diferidos para la ejecución del proyecto	109
Tabla 4.24	Costos de mano de obra	110
Tabla 4.25	Insumos necesarios para el proceso de digestión y empaque	111
Tabla 4.26	Parte 1 Mantenimiento preventivo y correctivo de las instalaciones	111
Tabla 4.27	Parte 2 Mantenimiento preventivo y correctivo de las instalaciones	112
Tabla 4.28	Costos fijos de la planta por tipo	112
Tabla 4.29	Crecimiento de la producción para los primeros 5 años de operación	114
Tabla 4.30	Precios de los principales materiales reciclables	115
Tabla 4.31	Precios de los principales abonos orgánicos	117
Tabla 4.32	Estado de resultados para el primer año de operación	120
Tabla 4.33	Primera parte del estado de flujo de efectivo	122
Tabla 4.34	Segunda parte del estado de flujo de efectivo	123
Tabla 4.35	Determinación del costo de capital esperado para el proyecto	124
Tabla 4.36	Parámetros de reducción de la contaminación atmosférica	126

## NOMENCLATURA

BANOBRAS	Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos
BEI	Banco Europeo de Inversiones
CC	Caballos Caldera
CER	Certificado de Reducción de Emisiones
CFC	Cloro Fluoro Carbonos
CICC	Comisión Intersecretarial de Cambio Climático
CMNUCC	Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
COV	Carga Orgánica Volumétrica
CPPC	Costo Promedio Ponderado de Capital
CRE.	Comisión Reguladora de Energía
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
DBO	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DIS	Diagnóstico Integral de la Situación Actual
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EIM	Evaluación del Impacto Medioambiental
EOD	Entidades Operativas Designadas
FODA	Fortalezas Oportunidades Debilidades y Amenazas
GMCV	Gas Metano Comprimido Vehicular
GEI	Gas de Efecto Invernadero
GN	Gas Natural
HFC	Hidro Fluoro Carbonos
HP	Horse Power (Caballos de Fuerza)
IC	Implementación Conjunta
INE.	Instituto Nacional de Ecología
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INPC	Índice Nacional de Precios al Consumidor
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
MH	Masa Húmeda
MS	Masa Seca
MV	Masa Volátil
NOM	Norma Oficial Mexicana
PPS	Proyecto para la Prestación de Servicios
PTU	Participación de los Trabajadores en las Utilidades
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SENER	Secretaría de Energía
TRH	Tiempo de Retención Hidráulica
TIIE	Tasa de Interbancaria de Interés de Equilibrio
TIR	Tasa Interna de Retorno
VPN	Valor Presente Neto

## RESUMEN

Este trabajo consistió en una pre-evaluación técnica, ambiental, social y financiera de una planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos principalmente que provienen de mercados, con el sistema de degradación anaerobia de la fracción orgánica, para producir: Fertilizante orgánico y gas metano comprimido para uso vehicular; este último procedente de la purificación del biogás que se genera en la descomposición.

Para situar la instalación de la planta de biogás se realizó desde, un análisis nacional de climas y temperaturas, hasta un análisis de costo mínimo entre tres alternativas municipales. Veracruz tiene una importancia agrícola como segundo lugar en superficie sembrada y cosechada a nivel nacional. En la región cada persona genera 0.8 kg/día de residuos sólidos urbanos, sin embargo el Puerto de Veracruz genera diariamente 600 ton que equivalen a 1kg/hab•día. En este municipio existen 7 mercados cuya generación se compone principalmente de residuos orgánicos y generan una cantidad de 150 ton/día. Tratando en la planta de biogás, la biomasa que proviene de estos mercados, se generarían 8,100 Nm<sup>3</sup> de biogás diariamente. El 45% puede utilizarse para generar una potencia eléctrica de 1,072 kW y el resto se purificará para la producción de 1,642.35 Nm<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/día que serán comprimidos y podrán abastecerse alrededor de 96 vehículos (tanque de almacenamiento de 17 m<sup>3</sup>). Los lodos digeridos resultantes del proceso son 315.56 ton/día que se acondicionarán para generar 18.17 ton/día de fertilizante orgánico con un porcentaje de humedad de 35%, adecuado para aplicarlo en campos de cultivo y sustituir una fracción de las fórmulas químicas. También se determinó que el tiempo de retención hidráulica sería de 15 días y se usaría una temperatura promedio de operación de 55°C al interior de dos tanques cilíndricos de hormigón de 5 m de altura y casi 35 m de diámetro.

La inversión fija para el desarrollo de este proyecto es de \$66,101,120.58, las inversiones en activo diferido (gastos preoperativos, constitución de la sociedad mercantil, publicidad, imprevistos, etc.) suman \$5,865,063.83 y el capital de trabajo se estima en \$5,000,000.00. La estructura de costos se resume de la siguiente forma: Mano de obra 25%, insumos 26%, energía 0%, gastos fijos 34% y mantenimiento 15%. Los ingresos para el primer año serán de \$26,000,000.00. Se consideró un horizonte de planeación de 10 años y al final de este periodo se estima que los ingresos ascenderán a \$48,000,000.00. La utilidad bruta para los últimos 6 años sobrepasaría el 50%. La Tasa Interna de Retorno (TIR) del proyecto resulta de 33% por lo que el periodo de recuperación de la inversión es entre 5 y 6 años. La estructura de financiamiento propuesta genera un Costo Promedio Ponderado de Capital (CPPC) de 15.5% que da como resultado un Valor Presente Neto (VPN) de \$14,419,440.00. El índice Beneficio-Costo es de 1.53 para el municipio, tomando en cuenta los flujos de efectivo arrojados por el proyecto y el ahorro que generaría la reducción del 25% de los residuos que llegan actualmente a disposición en el puerto.

Finalmente, la implementación del proyecto genera importantes beneficios sociales y ambientales. Alrededor de 51 empleos directos, reducción de la contaminación de mantos acuíferos, reducción de plagas y otros vectores infecciosos, aumento de la tasa de reciclaje y la reducción de 26,223 Ton CO<sub>2</sub>e por año, con lo que se contribuye a mitigar el calentamiento global.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la humanidad se encuentra posiblemente ante el desafío más grande de todos los tiempos, un fenómeno cuyas consecuencias son irreversibles y cuyas causas son parte del motor que impulsa el sistema económico moderno: *El cambio climático*. El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (PICC) define este fenómeno como la suma de las variaciones en el clima a través del tiempo, ya sea por procesos naturales o como resultado de las actividades humanas; sin embargo, está comprobado por la comunidad científica mundial que los volúmenes generados de Gases de Efecto Invernadero (GEI) como el CO<sub>2</sub> en los últimos 150 años, han rebasado la capacidad de captura de la biósfera y la consecuencia es el aumento gradual de las concentraciones en la atmósfera. Ésto impide el desalojo natural de energía térmica en el planeta y causa el inevitable aumento de la temperatura.

Contrario a lo que piensan los escépticos, existen pruebas contundentes de las dimensiones del problema; por ejemplo, la temperatura media de los últimos 15 años ha sido la más alta jamás registrada (CICC, 2007). El ártico ha perdido el 40% de su espesor y podría desaparecer en 2030, el aumento del nivel del mar registrado en todo el mundo, derretimiento potencial del Permafrost, aumento de la frecuencia de ciclones y tormentas tropicales y las miles de muertes por olas concentradas de calor. En México, el número promedio de incendios de los últimos 35 años casi se ha duplicado, se ha registrado en Veracruz que el nivel del mar se eleva a razón de casi 2mm por año, la temperatura media anual de 2000-2007 se ha elevado en 1°C y el 40% de los ciclones más intensos se han suscitado en el periodo 2000-2006 (CONAGUA, 2008).

Según el IPCC los países en vías de desarrollo emiten el 59% del total de gases de efecto invernadero (CICC, 2007) y México se ubica en 13° lugar a nivel mundial. De los 643 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e<sup>1</sup> que genera el país, el 24% proviene de la generación de energía, el 18% del transporte y el 10% se genera por la descomposición de los desechos orgánicos. La falta de manejo integral de estos últimos genera, además, los siguientes problemas: Contaminación de aguas superficiales y subterráneas, dificultad para el reciclaje de materiales inorgánicos, proliferación de plagas y contagio de enfermedades, daños a la infraestructura, mala imagen y diversos problemas socio-económicos.

Gracias a que México ratificó el Protocolo de Kioto en el año 2000, es posible acceder a los mercados de carbono a través de los Mecanismos para el Desarrollo Limpio que se estructuraron para ayudar a que los países desarrollados cumplan con sus metas de reducción de emisiones y los países emergentes obtengan financiamiento y mejoren las eficiencias de sus procesos productivos.

---

<sup>1</sup> Toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes, nomenclatura utilizada por la CICC

Se ha corroborado mediante recuentos anecdóticos que ya en el siglo XVI, el gas que se desprendía de la degradación natural de los residuos servía como combustible de cocina en la antigua Persia. Pero fue hasta 1859 en una comunidad de Bombay, en la India, que se construyó la primera planta de tratamiento cuya función era provocar la descomposición acelerada de los residuos para generar biogás. Para denominar a esta tecnología, con el paso del tiempo se acuñó el término de degradación anaerobia (Murphy y McKeogh, 2004).

Hoy en día, el tratamiento anaerobio es uno de los procesos más utilizados en el aprovechamiento de los residuos orgánicos de hogares, granjas, industrias y municipios; además de ser un proceso vital en el tratamiento de aguas residuales. En la Unión Europea existen sistemas que han estado en operación por más de 20 años y tan sólo en Alemania se construyeron más de 250 estaciones en los 5 últimos años.

La simple quema de metano, uno de los principales componentes del biogás, es considerada un Mecanismo de Desarrollo Limpio (estructura derivada del protocolo de Kioto para que algunas iniciativas de los países en desarrollo puedan acceder a financiamiento por países desarrollados y a su vez éstos últimos puedan cumplir con sus metas de reducción de emisiones) debido a que cada molécula del mismo, contribuye 21 veces más que el producto de su oxidación (el CO<sub>2</sub>) al efecto invernadero. Es por esto que existen grandes oportunidades para que los países en desarrollo, donde la composición de los residuos es mayormente orgánica, apliquen esta tecnología.

En México, cada día se generan más de 100 mil toneladas de residuos sólidos urbanos, de los que aproximadamente 51mil son orgánicos. El 67% llega a sitios controlados, sólo el 58% a rellenos sanitarios que cumplan con normatividad y el resto es dispuesto en tiraderos a cielo abierto, barrancas, cuevas, lotes baldíos o fuentes de agua como los ríos y los lagos. El porcentaje que recibe tratamiento, ni siquiera es relevante a nivel nacional. Por otro lado, la mayoría de los rellenos sanitarios certificados han rebasado ya su vida útil, lo que exige que se generen alternativas tecnológicas, económicamente viables en el corto plazo, que ayuden a los municipios a brindar el servicio al que están obligados. (AMPV, 2008)

Según la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de Veracruz existen 32 rellenos sanitarios en operación y 7 en construcción, sin embargo, en el Puerto de Veracruz no existe un lugar de disposición adecuado. El porcentaje de la población que cuenta con el servicio tan sólo representa el 29% del total en el estado, es decir, de las 5,327 ton/día que se generan únicamente 1,932 ton/día llegan a vertederos autorizados. Estos datos reflejan una situación más crítica que el promedio nacional por lo que resultó interesante estudiar más a fondo la aplicación del tratamiento anaerobio con el objeto de reducir la cantidad de residuos, que de no aprovecharse, formarían parte de las 600 ton/día que deben enterrarse en la zona.

Evaluar un proyecto es conocer la conveniencia, de tal forma que asegure que habrá de resolver una necesidad humana en forma eficiente, segura y rentable, con el fin de

conseguir que se asignen en forma racional los recursos necesarios para llevarlo a cabo. En términos generales, cinco son los estudios que deben realizarse para evaluar un proyecto: Viabilidad comercial, técnica, legal, organizacional y financiera. El nivel de estudio de pre-factibilidad se basa principalmente en información de fuentes secundarias para definir con cierta aproximación las variables de mercado, técnicas de producción y prestaciones para un inversionista, es decir, se estimar las inversiones probables, los costos de operación y los ingresos que generará el proyecto (Sapag y Sapag, 1991).

Esta tesis contempla la ingeniería básica para el diseño de un sistema de tratamiento anaerobio aplicado a los residuos de los mercados principales de la región del Puerto de Veracruz y una evaluación de pre-factibilidad de la propuesta, con la finalidad de demostrar que es posible aplicar tecnología en la resolución de uno de los mayores problemas de nuestro país y verificar que la implementación del proyecto resultante, es viable desde el punto de vista técnico, financiero, social, ambiental y legal.

Los resultados obtenidos deberían servir de base para realizar la ingeniería de detalle y el estudio de factibilidad necesario para que los tomadores de decisiones puedan facilitar los recursos económicos en la decisión de invertir o no al momento de revisar el proyecto. Para tal efecto, se debe describir el sistema, su diseño, elaborar un plano de distribución de planta, presupuesto por cada tipo de activo que constituirá la sociedad mercantil, elaborar los estados financieros, revisar los principales indicadores y las prestaciones económicas de la propuesta, hacer una revisión de la normatividad que debe cumplir el proyecto; y todo esto al tiempo que se procura no afectar el medio ambiente y mejorar las condiciones de vida de la comunidad.

Por todo lo anterior se proponen los siguientes objetivos de la tesis.

### **Objetivo General**

- Evaluar un sistema para el tratamiento de residuos sólidos urbanos y la recuperación de biogás, utilizándolo como energía y compost, a partir del lodo digerido, en el Puerto de Veracruz.

### **Objetivos Específicos**

- Aprovechar los residuos sólidos orgánicos para la generación de biogás y compost.
- Proponer los procesos necesarios para utilizar el metano contenido en el biogás como combustible vehicular.
- Proponer la generación de un producto mejorador de suelos, a través de la mineralización de los nutrientes contenidos.
- Proponer el acondicionamiento de los materiales inorgánicos para su comercialización, como materia prima para nuevos procesos industriales.
- Verificar la pre-factibilidad técnica y financiera del proyecto.
- Cuantificar las contribuciones ambientales.
- Cualificar las contribuciones sociales hacia la comunidad.

## CAPÍTULO 1

### ANTECEDENTES

#### 1.1 Energías renovables y cambio climático

El fenómeno del cambio climático es el conjunto de variaciones en el clima a través del tiempo, resultado de procesos naturales o de las actividades humanas. La más clara manifestación del cambio climático, es el calentamiento global y se refiere al incremento promedio en la temperatura terrestre y marina (SEMARNAT, 2009).

Existen algunos factores que modifican el clima en forma temporal: Cada 41 mil años la tierra cambia la inclinación sobre su eje de 21.5° a 24.5°, actualmente el ángulo es de 23.5°. Ésto se conoce como cambio en la oblicuidad; cada 25 mil 800 años, la tierra realiza un movimiento de trompo conocido como precesión; cada 100 mil años cambia la excentricidad, es decir lo elíptico de la órbita; todo esto origina una reducción en la insolación por lo que los hielos que se forman en invierno no se derriten y se van acumulando, dando como resultado las llamadas glaciaciones (SEMARNAT, 2009).

La actividad solar también tiene variaciones estacionales, como las manchas solares, que sólo pueden ser vistas con filtros especiales. Cuando el sol tiene una mayor cantidad de manchas (cada 11 mil años), emite más energía y por lo tanto llega una mayor cantidad de la misma a la tierra.

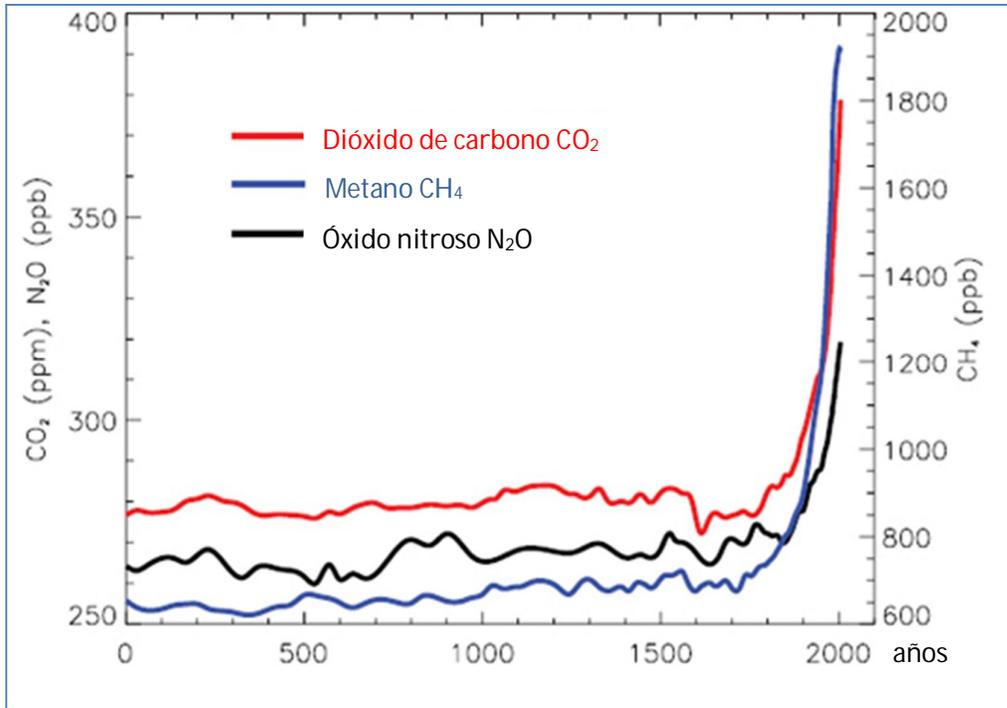
Si bien es cierto que el clima cambia de manera natural, los incrementos en la temperatura en los últimos 50 años se atribuyen a las actividades humanas, es decir, el proceso de industrialización de las naciones y la consecuente quema acelerada de los combustibles fósiles. Al quemarse, los combustibles fósiles producen gases como el dióxido de carbono que pertenece al grupo de los llamados gases de efecto invernadero (GEI). La tierra es un gran invernadero, en realidad estos gases se encuentran de manera natural en la atmósfera<sup>1</sup> y gracias a ellos la tierra posee la temperatura que hace posible la vida. Sin embargo en los últimos 50 años la concentración de dióxido de carbono ha sido la más alta jamás registrada, y las proyecciones para el siguiente siglo arrojan escenarios desalentadores, como se ve en la Figura 1.1.

Los principales gases de efecto invernadero son: Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), ozono (O<sub>3</sub>) y el vapor de agua (Figura 1.2). Algunos de estos gases generan un mayor impacto en el efecto invernadero por la gama de longitudes de onda infrarroja que son capaces de absorber. Por ejemplo, el potencial de calentamiento global del óxido nitroso con respecto al CO<sub>2</sub> es 310 veces mayor. El potencial de calentamiento del CO<sub>2</sub> se considera 1 y es la base para determinar los índices asociados con los siguientes gases.

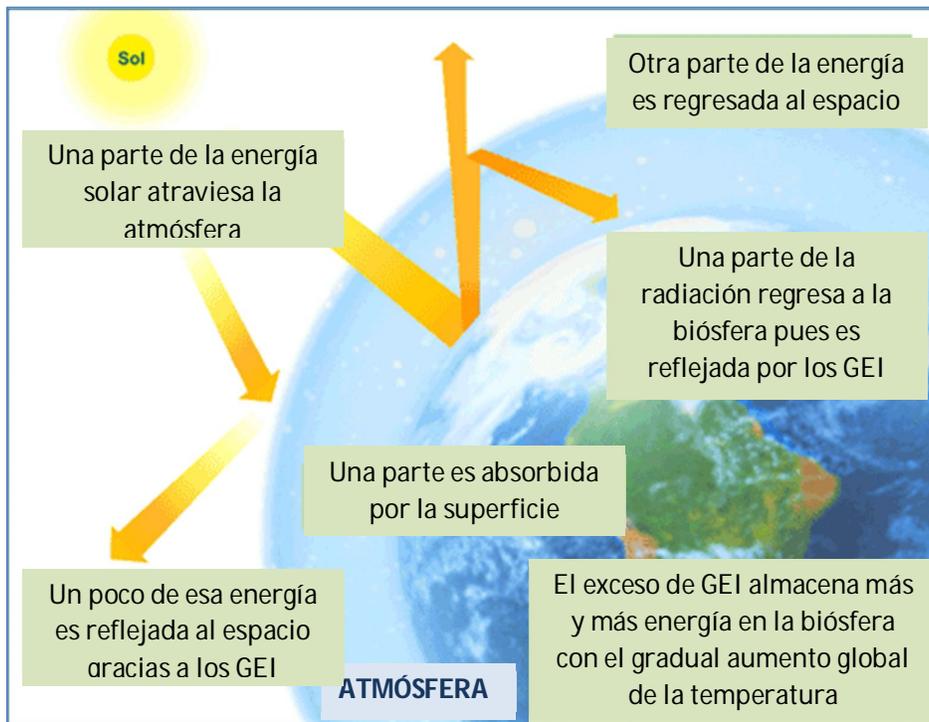
Ante esta situación, México firmó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) de 1992, misma que ratificó en 1993. De igual forma, ratificó el llamado Protocolo de Kioto en el 2000 mediante el cual, los países desarrollados se comprometen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en no menos del 5% con respecto a 1990, para el periodo de 2008-2012.

---

<sup>1</sup> La composición seca de la atmósfera terrestre es de: 78% hidrógeno, 21% oxígeno, 0.9% argón, 0.03% dióxido de carbono.

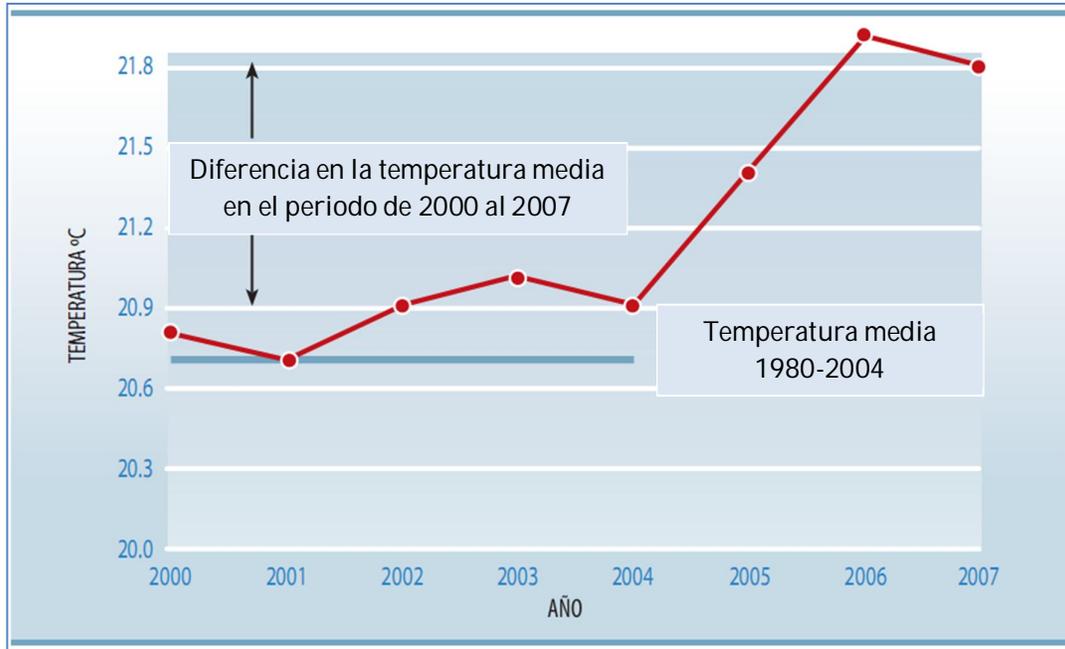


**Figura 1.1** Concentración atmosférica en partes por millón y partes por billón de los gases de efecto invernadero a través del tiempo (CICC, 2007)



**Figura 1.2** El efecto invernadero (SEMARNAT, 2009)

El país sufre ya los efectos del calentamiento global provocado por el cambio climático. Desde el año 2000, se ha registrado un aumento de 1°C en la temperatura media anual del país (Figura 1.3). Se ha registrado un incremento de 10 cm en el nivel del mar en Veracruz desde 1995 (Figura 1.4) y el número de huracanes de gran intensidad han aumentado considerablemente en los últimos 10 años (Figura 1.5). Este aumento en la altura del mar, puede significar miles de kilómetros de costas inundadas por agua salobre (CMM, 2008).



**Figura 1.3 Aumento de la temperatura anual promedio (SMN, 2008)**

Los gases de efecto invernadero se han generado desde siempre. El vulcanismo, la vegetación y los océanos, la actividad biológica como la respiración de plantas y animales, así como la descomposición microbiana de la materia orgánica han liberado metano, dióxido de carbono y vapor de agua desde hace miles de años. Sin embargo, los humanos hemos contribuido considerablemente con las actividades diarias. La generación de electricidad, la construcción, la eliminación de la vegetación, la producción de alimentos y otros bienes de consumo generan a diario un importante aumento en la concentración de los GEI.

Los países que más contribuyen al problema son: Estados Unidos, China, Rusia, Japón e India en los primeros 5 sitios y en el 13° lugar se encuentra México. En el 2002, la principal fuente de GEI en nuestro país fue el sector energético, que incluye la energía necesaria para el transporte, con un 70% de las emisiones (SEMARNAT, 2009).

No se necesita ser un gran tecnólogo para saber que si se reduce el consumo de combustibles fósiles se reduciría en la misma proporción la cantidad de GEI, sin embargo, la solución no es tan sencilla. La economía se sostiene en la explotación de los recursos, la industria y los servicios y no es posible frenar alguno de estos sectores. Una de las alternativas es mejorar la eficiencia de los procesos (que se generen al menos los mismos niveles de resultados empleando menos recursos), otra opción es el uso de tecnologías revolucionarias que aprovechen la energía que en forma natural se renueva, es decir, las energías renovables.

Se define como energía renovable a aquella cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza. Es decir, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por la humanidad, que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua o periódica, y se enumeran a continuación: El sol, energía solar; el viento, energía eólica; los ríos y corrientes de agua dulce, energía hidráulica; los mares y océanos, energía mareomotriz; el calor de la Tierra, energía geotérmica; las olas, energía undimotriz y la materia orgánica o biomasa.

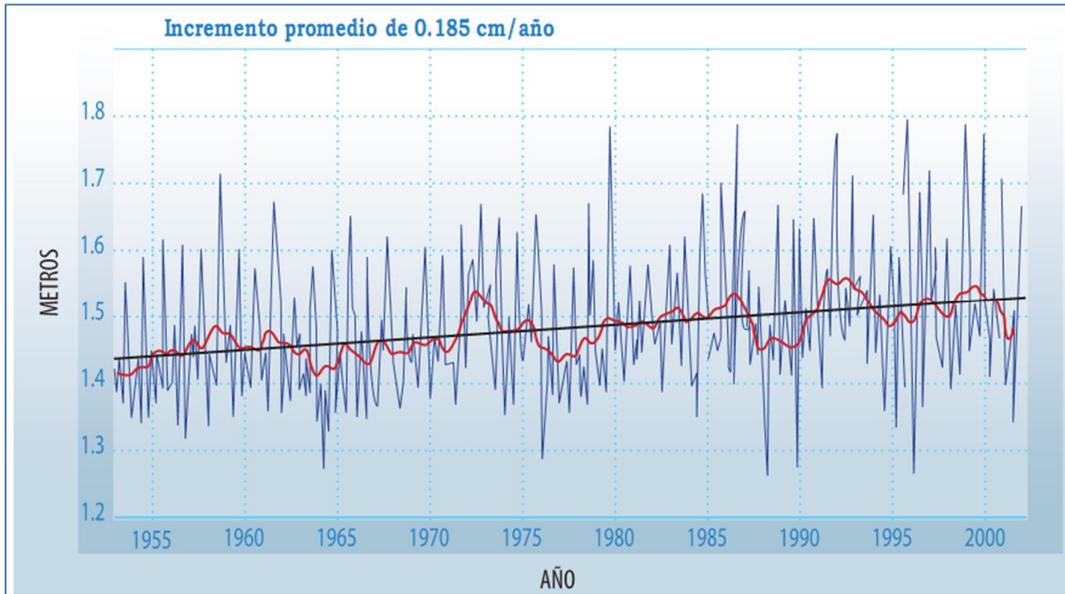


Figura 1.4 Aumento del nivel del mar en Veracruz (SMN, 2008)

## 1.2 Biomasa

La biomasa ha sido una fuente energética esencial para el hombre desde principios de la historia de la humanidad. Este recurso energético perdió importancia en el mundo industrial por la llegada de los combustibles fósiles, por lo que en la actualidad los principales usos que tiene la biomasa son domésticos.

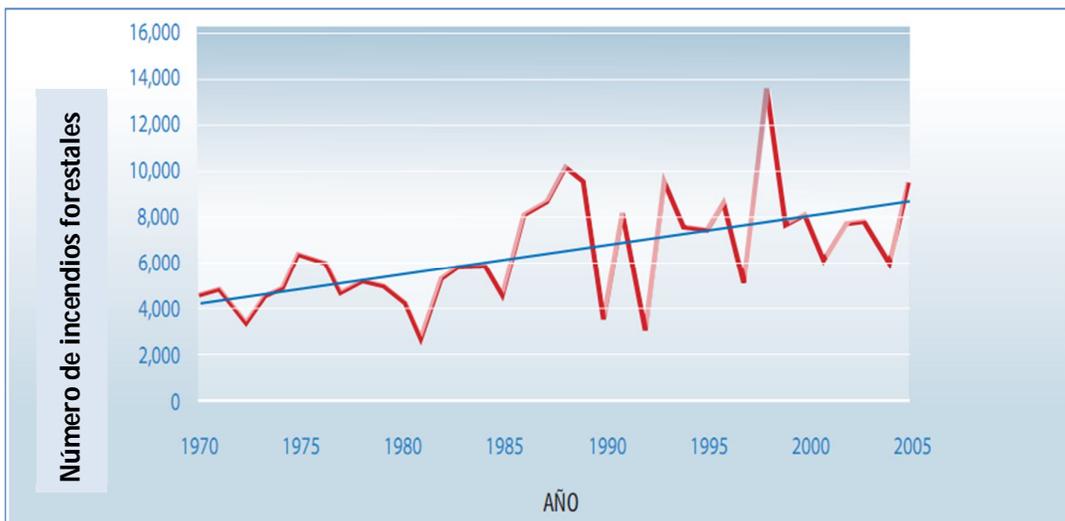


Figura 1.5 Número de incendios Forestales en México (CNF, 2007)

La biomasa, abreviatura de masa biológica, es la cantidad de materia viva producida en un área determinada de la superficie terrestre, o por organismos de un tipo específico. El término es utilizado con mayor frecuencia en las discusiones relativas sobre la energía de biomasa, es decir, al combustible energético que se obtiene directa o indirectamente de recursos biológicos. La energía de biomasa que procede de la madera, residuos agrícolas y estiércol, continúa siendo la fuente principal de energía de las zonas en desarrollo (CONUEE, 2010b).

En términos energéticos, se puede considerar una fuente renovable debido a que en esencia, proviene del sol. En la fotosíntesis las plantas convierten el dióxido de carbono del ambiente y el agua del suelo en carbohidratos para formar la materia orgánica, gracias a la clorofila que ayuda a absorber la energía de la luz solar. Cuando estos carbohidratos se queman se convierten nuevamente en dióxido de carbono y agua, liberando la energía que contienen, completando un ciclo que puede preservarse indefinidamente (BUN-CA, 2002).

Existen diferentes tipos de biomasa que pueden ser utilizados como recursos energéticos; biomasa natural, residual seca y húmeda y los cultivos energéticos.

- Biomasa natural. Es la que se produce en la naturaleza sin ninguna intervención humana. El problema que presenta este tipo de biomasa es la necesaria gestión de la adquisición y transporte del recurso al lugar de utilización. Ésto puede provocar que la explotación de esta biomasa sea inviable económicamente.
- Biomasa residual (seca y húmeda). Son los residuos que se generan en las actividades agrícolas (leñosos y herbáceos) y ganaderas, en las forestales, en la industria maderera y agroalimentaria, entre otras y que todavía pueden ser utilizados y considerados subproductos. Se denomina biomasa residual húmeda a los vertidos llamados biodegradables, es decir, las aguas residuales urbanas e industriales y los residuos ganaderos
- Cultivos energéticos. Estos cultivos se generan con la única finalidad de producir biomasa transformable en combustible. Estos cultivos se pueden dividir en:
  - a. Cultivos ya existentes como los cereales, oleaginosas, remolacha, etc.
  - b. Lignocelulósicos forestales (chopo, sauces, etc.)
  - c. Lignocelulósicos herbáceos como el cardo
  - d. Otros cultivos como la patata

La utilización de la biomasa con fines energéticos tiene las siguientes ventajas, en función de la tecnología usada y las condiciones de la región en la que se sitúe:

- Disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero
- No emite contaminantes sulfurados o nitrogenados, ni apenas partículas sólidas
- Los cultivos energéticos sustituirán a cultivos excedentarios en el mercado de alimentos. Eso puede ofrecer una nueva oportunidad al sector agrícola
- Puede provocar oportunidades económicas en entornos suburbanos y rurales
- Disminuye la dependencia externa del abastecimiento de combustibles
- Aumenta la vida útil de los sitios de disposición final de residuos y facilita su operación
- Cuando se utiliza como biomasa la parte orgánica de los residuos sólidos domiciliarios, se facilita el aprovechamiento de algunos materiales

Antes de que la biomasa pueda ser usada como energía debe ser convertida en una forma más conveniente para su transporte y utilización como el carbón vegetal, gas, etanol y electricidad.

### 1.2.1 Procesos de conversión de la biomasa

- **Combustión directa:** Se utilizan sistemas para generar calor que puede ser aplicado directamente para cocción de alimentos o secado de productos agrícolas, o indirectamente en la producción de vapor para procesos industriales o generación de electricidad. Puede consistir en módulos simples como estufas, hornos y calderas o módulos avanzados como la combustión de lecho fluidizado.

Suelen ser sistemas ineficientes pues mucha de la energía liberada es desperdiciada y en condiciones no controladas pueden causar contaminación. Sin embargo, con buenas prácticas de producción como la densificación<sup>2</sup> o el secado de la biomasa, además de diseños adecuados, se logra una combustión más completa y en consecuencia una mayor eficiencia.

- **Procesos termoquímicos:** Estos procesos transforman la biomasa en un producto de más alto valor, con una densidad y un poder calorífico por unidad de masa mayor. Cuando la biomasa es quemada bajo condiciones controladas, sin hacerlo completamente, su estructura se rompe en compuestos gaseosos, líquidos y sólidos que pueden ser utilizados como combustible para generar calor y electricidad. El proceso básico se llama pirólisis o carbonización e incluye:

- **Producción de carbón vegetal.** La biomasa se quema con una disponibilidad restringida de aire, lo cual impide que se complete. El residuo sólido se usa como carbón, el cual tiene mayor densidad, no produce humo y es ideal para uso doméstico.

La forma más antigua de producirlo es en hornos de tierra y mampostería. Para los primeros se realiza una excavación en donde se coloca la biomasa, la cual es cubierta con tierra y vegetación y en los segundos se utiliza arcilla, ladrillos e incluso acero, lo que incrementa la inversión inicial pero aumenta la eficiencia y capacidad de producción, así como la calidad final de los productos.

- **Gasificación.** Tipo de pirólisis en la que se utiliza una mayor proporción de oxígeno con el objeto de optimizar la producción de gas, constituido por una mezcla rica en metano, monóxido de carbono y nitrógeno. Las ventajas que tiene la utilización de este gas con respecto a la biomasa natural son:
  - Es versátil y se puede utilizar para los mismos usos que el gas natural
  - Puede quemarse en motores de combustión y turbinas de gas para generar electricidad y calor
  - Posee menos impurezas y al quemarse genera menos contaminantes

---

<sup>2</sup> Se refiere al proceso de compactar la biomasa en briquetas para facilitar su utilización, almacenamiento y transporte. Las briquetas son para usos domésticos, comerciales e industriales. La materia prima puede ser aserrín, desechos agrícolas y partículas de carbón vegetal, el cual se compacta a altas presiones.

- Procesos bioquímicos. Estos procesos utilizan las características bioquímicas de la biomasa y la acción metabólica de los microorganismos para que puedan producir combustible líquido o gaseoso. Son más apropiados para la conversión de la biomasa húmeda. Los más importantes son los siguientes:
  - Degradación anaerobia. Ésta transformación húmeda se realiza en un ambiente sin oxígeno y produce un combustible llamado biogás. En general, se coloca la biomasa en un recipiente cerrado y allí se deja fermentar algunos días. Dependiendo de la temperatura se produce una cierta cantidad de gas rico en metano y dióxido de carbono.<sup>3</sup>
  - Combustibles alcohólicos. Se refiere principalmente a la producción de combustibles líquidos como el etanol y metanol. El primero se produce por fermentación de azúcares y el segundo por la destilación de madera. Estos procesos se han utilizado durante siglos para la elaboración de licores y actualmente los destilados pueden ser empleados en forma pura o combinados, para transporte o propulsión de máquinas.
  - Biodiésel. Se compone de ácidos grasos y ésteres alcalinos, obtenidos de aceites vegetales, grasa animal y grasas recicladas. A partir de un proceso llamado transesterificación, los aceites derivados orgánicamente se combinan con alcohol y se alteran químicamente para formar ésteres grasos como el etil o metilo éster. Pueden ser mezclados con diésel en porción de 20%, aunque otras cantidades también sirven, dependiendo del costo del combustible base y de los beneficios esperados. Su gran ventaja es reducir las emisiones considerablemente, así como el humo y el olor (BUN-CA, 2002).

Gracias este abanico de posibilidades tecnológicas, se puede obtener energía a partir de los residuos sólidos urbanos y de los lodos de las centrales depuradoras y potabilizadoras de agua. Energía, que en principio es contaminante, pero que lo sería en mucha mayor medida si no se aprovechase, pues el proceso natural de putrefacción de la materia orgánica tiene como resultado la emisión de gas metano y dióxido de carbono (GEI).

### **1.3 Residuos sólidos urbanos (RSU)**

A partir de la segunda mitad del siglo XX, el mundo comenzó a vivir una industrialización acelerada, intensificándose con el paso de los años. Ésto provocó una expansión económica sin precedentes asociada a una mayor demanda de bienes y productos para una población cada vez más numerosa y con patrones de consumo más exigentes. Como consecuencia se han agravado los problemas ambientales de contaminación atmosférica y de generación de residuos (SEDESOL, 2005).

Desafortunadamente la falta de visión de la humanidad, para generar la infraestructura necesaria al ritmo que se acrecentaban las demandas de tratamiento y disposición adecuada de los residuos, originó que éstos últimos se depositaran en forma y lugares que incrementaron la problemática.

Según la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos en México, éstos se clasifican en tres grandes grupos.

---

<sup>3</sup> Este tema se tratará con mayor profundidad en el siguiente capítulo

- Residuos sólidos urbanos: Son los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública, y de los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por la misma ley en otra categoría.
- Residuos peligrosos: Son todos aquellos que posean alguna característica de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos, así como envases embalajes o empaques que puedan contaminar los suelos.
- Residuos de manejo especial: Son aquellos generados en los procesos productivos que no reúnen las características para ser considerados peligrosos o como sólidos urbanos que son producidos por grandes fuentes de residuos sólidos.

Además de los incompatibles, que son los que al entrar en contacto o ser mezclados con agua u otros materiales o residuos reaccionan produciendo calor, presión, fuego, partículas, gases o vapores dañinos.

Tienen también la clasificación de residuos urbanos según la citada ley, los siguientes:

- Residuos procedentes de la limpieza de vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas.
- Animales domésticos muertos, así como muebles, enseres y vehículos abandonados.
- Residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria.

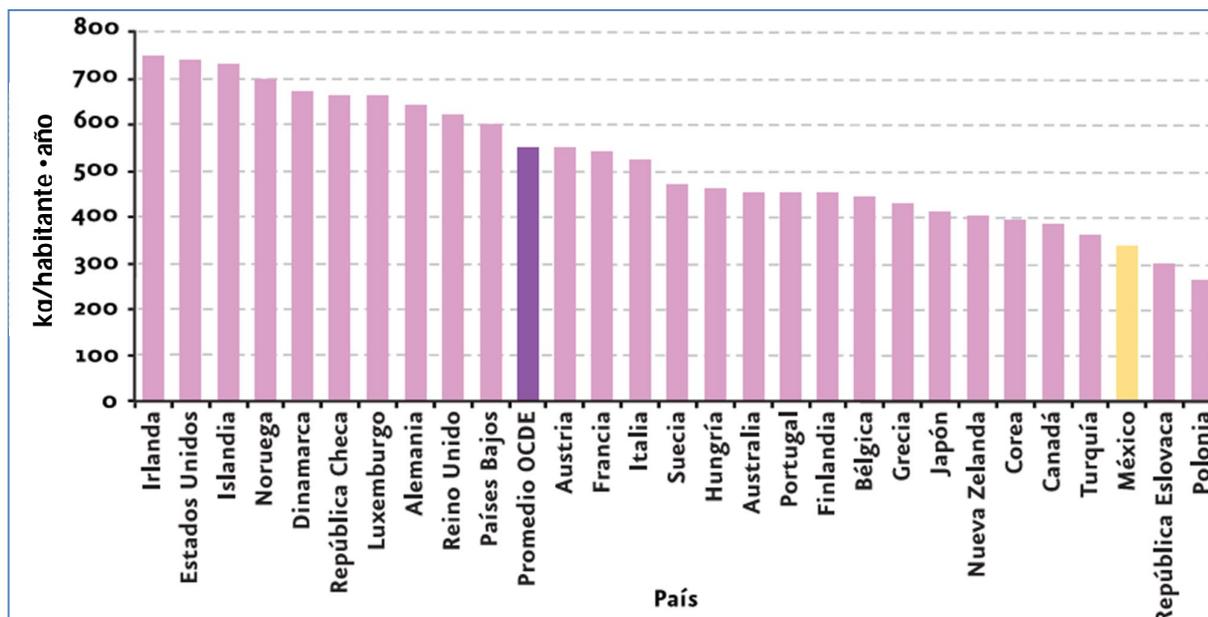
A todo esto hay que añadir la fracción de residuos producidos en los domicilios, pero que por su toxicidad tienen la consideración de residuos peligrosos y que se tratan aparte:

- Aceites minerales. Procedentes de los vehículos ciudadanos
- Baterías de vehículos
- Residuos de material electrónico. Teléfonos móviles, computadoras, etc.
- Electrodomésticos de línea blanca. Pueden contener Cloro Fluoro Carbono, perjudicial para la capa de ozono
- Medicamentos
- Pilas
- Productos químicos en forma de barnices, colas, disolventes, ceras, etc.
- Termómetros
- Lámparas fluorescentes y bombillas de bajo consumo

Durante los últimos años, en México se ha manifestado un alza importante en la cantidad de residuos generados; de 1997 a 2004 la generación total de RSU tuvo un ascenso de 40%, y seguía en aumento (SEMARNAT, 2005). En los últimos 10 años, se elevó un 26%, debido a que se relaciona íntimamente con el incremento de la población y los hábitos de consumo (SEMARNAT, 2008a).

En 2007 se estimó una generación de 36.9 millones de toneladas, lo que equivale a una producción diaria de 101 mil toneladas. Esta cifra se ha logrado a través de crecimientos sin precedentes en los últimos 50 años, ya que se calcula que se incrementó desde una generación de 300 g/hab•día en aquel entonces, a casi 1 kg/día en 2007. Considerando a los países de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), en 2006 la generación resultó un 39% menor al promedio de los países que la componen

(336 contra 550 kg/hab•año). En este año, un ciudadano mexicano generó un 29% más residuos que un polaco (Figura 1.6) y cerca del 45% de lo que generó un irlandés (OCDE, 2008).



**Figura 1.6 Generación de residuos per cápita a nivel mundial (OCDE, 2008)**

En cuanto a la generación nacional de residuos, también existen diferencias importantes por región. Por ejemplo, el centro contribuye con la mitad de la generación total de RSU, seguido por la frontera norte con el 16% del total, y el Distrito Federal con el 13%. En 10 años, la generación por zona ha aumentado considerablemente, en la región centro un 33%, en el sur 26% y 13% en el Distrito Federal. Sin embargo, la frontera norte aumentó casi tres veces su generación y la región norte la disminuyó en un 33% (SEMARNAT, 2008b).

Algunos datos importantes son las relaciones entre los tamaños de las poblaciones y las contribuciones respectivas a la generación total (Figura 1.7). Por ejemplo, las poblaciones rurales o semiurbanas cuya población es menor a los 15 mil habitantes donde vive un 37% de los habitantes del país, contribuye con el 13.6% del volumen total, las zonas metropolitanas, con más de un millón de habitantes, con el 50%, aumentando un 48% en 10 años.

Según el artículo 18 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos, los residuos sólidos urbanos podrían clasificarse en orgánicos e inorgánicos con objeto de facilitar su clasificación primaria y secundaria de acuerdo con los programas estatales y municipales de prevención y gestión integral de residuos, así como ordenamientos aplicables; a continuación se hablará un poco más de ellos.

### 1.3.1 Composición de los residuos

Según SEMARNAT (2009) se ha encontrado una correlación entre la composición de los residuos y las condiciones económicas del país. Aquellos con menores ingresos generan una menor cantidad de residuos y en sus componentes predomina la materia orgánica. En

México, la generación de RSU por tipo también ha cambiado drásticamente en los últimos años: En la década de los 50s el porcentaje de los residuos orgánicos oscilaba entre el 65 y 70%, mientras que para 2007 la cifra se redujo hasta el 50% (Figura 1.8).

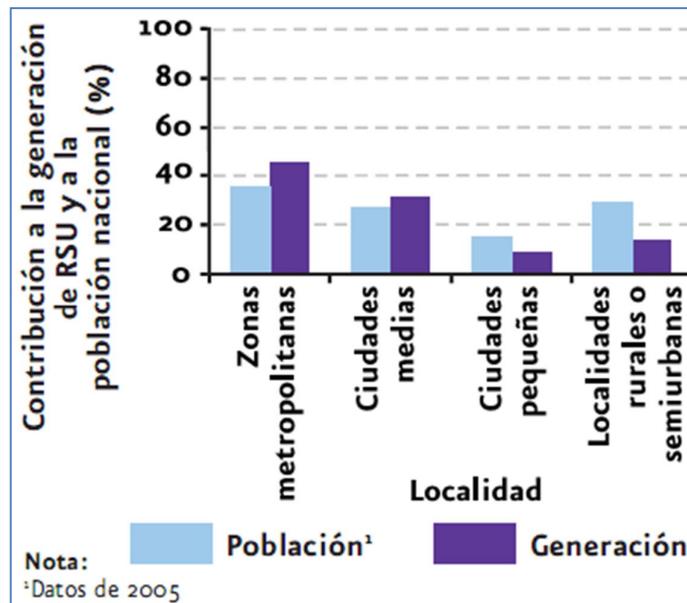


Figura 1.7 Generación de residuos sólidos urbanos por zona (INEGI, 2005)

Las categorías que mejor describen los residuos en la actualidad se forman de los siguientes materiales:

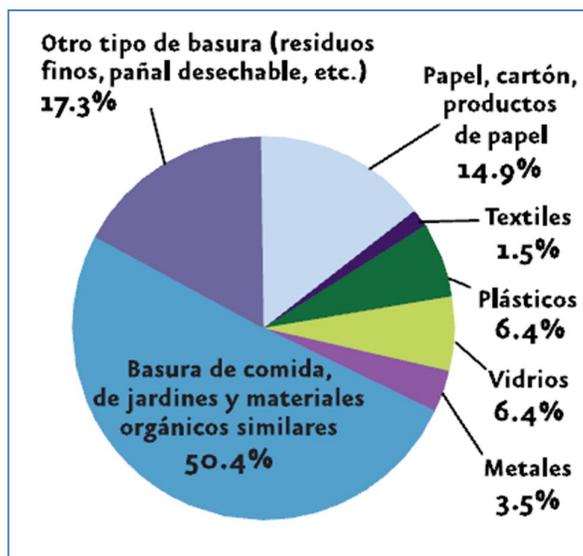
- Vidrio.- Son los envases de cristal, frascos, botellas, etc.
- Papel y cartón.- Periódicos, revistas, embalajes de cartón, envases de papel y cartón.
- Plásticos.- En forma de envases y elementos de otra naturaleza
- Textiles.- Ropas y vestidos y elementos decorativos del hogar
- Metales.- Son latas, restos de herramientas, utensilios de cocina, mobiliario, etc.
- Madera.- En forma de muebles mayoritariamente
- Escombros.- Procedentes de pequeñas obras o reparaciones domésticas
- Orgánicos.- Son los restos de comida, de jardinería, etc. En peso son la fracción mayoritaria en el conjunto de los residuos urbanos. Se caracterizan por degradarse mucho más rápidamente que los demás materiales.

### 1.3.2 Problemas asociados con un mal manejo de los residuos

Cada tipo de residuo afecta de manera específica a nuestro país; los inorgánicos pueden tardar miles de años en degradarse de manera natural, por lo que contaminan el suelo, volviéndolo improductivo y cuando se mezclan con los orgánicos generan lixiviados cargados de materiales peligrosos, especialmente para los mantos acuíferos. Por su parte, los residuos orgánicos al degradarse liberan gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global; dióxido de carbono y gas metano, siendo este último 23 veces más nocivo a tal efecto (IPCC, 1996).

Los residuos acumulados en las calles afectan la imagen y la infraestructura urbana. Cuando se acumulan cerca de las alcantarillas provocan las devastadoras inundaciones

que padecen las comunidades. Contaminan los lechos de los ríos, lagos y destruyen el hogar de millones de especies en los diversos ecosistemas (Tabla 1.1).



**Figura 1.8 Generación por tipo de residuos sólidos urbanos (SEDESOL, 2005)**

Los residuos orgánicos producen malos olores, originan plagas y contribuyen para la proliferación de la fauna nociva, teniendo como consecuencia diversas enfermedades entre la población.

**Tabla 1.1 Problemas asociados a la falta de manejo de los residuos (GTZ, 2003)**

Problema ambiental	Origen
Contaminación del suelo, de lagos y ríos superficiales y subterráneos.	La filtración de líquidos que producen los residuos orgánicos, que al mezclarse con los residuos peligrosos, se convierten en una sustancia sumamente tóxica. Estos líquidos son conocidos como lixiviados.
Generación de gas	La descomposición de los residuos vegetales y animales, que además de ser tóxicos y explosivos contribuyen al problema del calentamiento global.
Interrupción de cauces de agua, o desperfectos en el funcionamiento de los sistemas de drenaje y la salida de aguas negras, lo que provoca inundaciones.	Depósito de residuos en arroyos, canales, barrancas o en las vías públicas de las localidades.
Contaminación del agua. Muerte de organismos que comen residuos, se enredan o quedan atrapados en materiales elásticos o fibrosos que los estrangulan o inmovilizan	Depósito o arrastre de todo tipo de residuos hacia lagunas, mares o ríos
Contaminación del aire	Quema de residuos que libera partículas y sustancias que se respiran y que también se suman a los gases que contribuyen al cambio climático.

Los residuos pueden generar muchos problemas a la salud humana. Se pueden producir por distintos tipos de condiciones, o componentes que pueden ser:

- De origen biológico, a lo que comúnmente se conoce como fauna nociva que crece o prolifera cuando hay residuos manejados inadecuadamente y que transporta microbios que provocan enfermedades como el cólera, la rabia y otras (Tabla 1.2).
- De origen químico, como sustancias tóxicas, corrosivas, explosivas o inflamables.
- De origen físico, como objetos punzocortantes que causan heridas por las que pueden contagiarse enfermedades como el SIDA.

**Tabla 1.2 Enfermedades provocadas por la fauna nociva de los residuos sólidos (GTZ, 2003)**

Fauna nociva	Enfermedades que provoca	Información especial
Moscas	Cólera, fiebre tifoidea, salmonelosis, disentería, diarreas.	Las moscas pueden transmitir al menos 20 enfermedades graves. Su radio de acción puede ser de 10 km en 24 horas. En sólo un kg de residuos se pueden reproducir cerca de 70,000 moscas.
Cucarachas	Fiebre tifoidea, gastroenteritis, lepra, intoxicación alimentaria.	Las cucarachas pueden transmitir más de 70 enfermedades y cerca de 8% de la población humana es alérgica a ellas.
Ratas	Peste bubónica, tifus murino, leptospirosis, diarreas, disentería, rabia.	Las ratas, además de que pueden transmitir enfermedades graves, contribuyen al deterioro y a la contaminación de los alimentos. Provocan también daños a los edificios y casas y pueden provocar incendios ya que roen el plástico de los cables eléctricos. Un dato asombroso, es que una sola pareja puede dar origen a cerca de 10 mil descendientes en el transcurso de un año.
Mosquitos	Malaria, fiebre amarilla, dengue, encefalitis vírica.	

Otras enfermedades más graves aún son las causadas por la contaminación de agua o suelo con residuos de muy alta toxicidad, como es el caso del mercurio, cadmio, y otros productos empleados en actividades mineras, agrícolas e industriales. A veces estos residuos tan tóxicos también vienen de las propias casas, aunque por supuesto en cantidades mucho menores que en el caso de la industria.

Aunado al problema ambiental y de salud, tener una imagen de suciedad provoca efectos económicos negativos, ya que en una zona con grandes acumulaciones de basura baja el precio de los terrenos y casas, disminuye el atractivo turístico de las regiones y hace que los comerciantes o inversionistas no se interesen en hacer sus negocios en esas localidades.

El antiguo problema de la gestión de los residuos radicaba en cómo minimizar sus impactos en la flora y fauna, en los recursos, en la salud de las personas, en la calidad de vida, en los ciclos ecológicos y también en la infraestructura. Sin embargo, el nuevo reto, es desarrollar sistemas de tratamiento que, además de abatir la problemática actual, sean económicamente viables y auto sostenibles, minimizando de una vez por todas, la huella ambiental que dejan las ciudades.

#### 1.4 Gestión y manejo integral de los residuos sólidos

El manejo tradicional de los residuos urbanos comprende las fases de: Recolección, transporte y depósito en sitios o tiraderas municipales. En cada una de estas fases se producen impactos sobre el medio ambiente y la salud que pueden prevenirse, disminuirse o evitarse.

Para aprovechar los residuos y avanzar hacia un modelo sostenible (Figura 1.9) que necesita el planeta, existen diferentes alternativas de gestión. Antes de hablar de la tecnología sería interesante revisar el siguiente modelo de consciencia enfocado en resolver el problema de los residuos desde las fuentes de generación (Arvizu, 2010).



Figura 1.9 Modelo de manejo integral de residuos sólidos urbanos (GTZ, 2006)

Los puntos o etapas que se deben incluir en un plan de manejo integral de residuos sólidos urbanos según la Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales (Medina y Jiménez, 2001) son:

1. Reducción en la fuente
2. Reutilización y reciclaje
3. Tratamiento
4. Disposición final

Un interesante complemento a las alternativas tecnológicas es el modelo de las 5Rs, que se describe a continuación:

- *Rechazar*. Se refiere a un consumo inteligente al comprar productos que generen el mínimo impacto ambiental posible y evitando la adquisición de productos que a pesar de ser necesarios tengan implicaciones ambientales de importancia
- *Reducir*. La idea es consumir sólo lo indispensable y evitar adquirir artículos o servicios innecesarios en nuestras actividades diarias
- *Reutilizar*. Se refiere a encontrar otros usos para los productos cuyo objetivo principal ya ha sido cubierto o simplemente alargar la vida útil de los mismos
- *Reparar*. Para volver a encontrar un uso para algunos materiales como se menciona en el punto anterior, es en ocasiones necesario realizar alguna modificación o arreglo en el producto original
- *Reciclar*. Debería ser la última alternativa a elegir, ya que se refiere a procesos tecnológicos con aplicación de recursos energéticos y materiales que se podrían ahorrar. Tiene una aplicación limitada para ciertos materiales causada principalmente por la dificultad para encontrar mercados viables económicamente para los productos del reciclaje. Aun así, el impacto ambiental de la utilización de la mayoría, sí produce ahorros y ventajas ambientales

#### **1.4.1 Tratamientos comunes para los RSU**

##### *Tratamiento de los plásticos*

Los envases de plástico pueden someterse a tres tipos de procesos:

1. Reciclado mecánico
2. Reciclado químico
3. Valorización energética

El primero consiste en trocear el material para introducirlo posteriormente en una máquina extrusora-granuladora para moldearse después por los métodos tradicionales. Solamente puede aplicarse a los termoplásticos, que son aquellos que funden por la acción de la temperatura. Presenta dos problemas fundamentalmente. El primero es que el plástico ya utilizado pierde parte de sus propiedades lo que obliga a emplearlos en la fabricación de otro tipo de productos con menos exigencias. El segundo es la dificultad para separar los distintos tipos de plásticos. Para ello se han desarrollado diversos sistemas.

El segundo, reciclado químico se utiliza cuando el plástico está muy degradado o es imposible aislarlo de la mezcla en que se encuentra. Se define como la reacción reversible de la polimerización hacia la recuperación de las materias primas. Según el tipo de polímeros se distinguen dos clases de procesos:

1. Polímeros de adición. Por dos procedimientos diferentes
  - Vía térmica. Se usan los siguientes sistemas:
    - Pirólisis
    - Gasificación
    - Cracking
  - Vía catalítica. Son los siguientes:
    - Hidrogenación
    - Hidrocracking
    - Cracking.
2. Polímeros de condensación. Se aplican los siguientes:
  - Hidrólisis
  - Metanólisis
  - Glicólisis
  - Otros

Por último la valorización energética es un tratamiento adecuado para plásticos muy degradados. Es una variante de la incineración en la que la energía asociada con el proceso de combustión es recuperada para generar energía. Las plantas en las que se realiza se asemejan a una central térmica pero difieren en el combustible que en este caso son residuos plásticos.

#### *Tratamiento del vidrio*

Los envases de vidrio se pueden reciclar sin que el material pierda ninguna de sus propiedades. Una vez recogidos son limpiados de toda partícula de tierra o grasa. Las botellas pasan por algunos tamices y martillos para formar un polvo más fino, que sometido a altas temperaturas en un horno, se funde para ser moldeado nuevamente en forma de botellas, frascos, tarros, etc. que tienen exactamente las mismas cualidades que los objetos de que proceden. El proceso supone un ahorro de materias primas y de energía muy considerable.

#### *Tratamiento del papel y cartón*

Consiste en la recuperación de las fibras de celulosa, mediante separación en soluciones acuosas en las que se incorporan sustancias tensoactivas<sup>4</sup> con el fin de eliminar la tinta. La tinta queda en la superficie del baño y se puede separar con facilidad.

Una vez retirada la tinta, se somete la suspensión de las fibras a un secado sobre una superficie plana, para recuperarlas. Después pasan por unos rodillos que las aplanan y compactan, saliendo finalmente la lámina de papel reciclado.

#### *Tratamiento de los metales*

Los envases de acero estañado, más conocidos como hojalata, son perfectamente reciclables, se emplean en la fabricación de otros envases o como chatarra en las fundiciones siderúrgicas después de haber sido desestañada la hojalata. Todo el acero recuperado se recicla por las necesidades de las acereras. El proceso de reciclado de la hojalata reduce el consumo energético de forma muy notable.

---

<sup>4</sup> Sustancias que influyen por medio de la tensión superficial, en la superficie de contacto entre dos fases, pueden aglomerar, emulsionar o flocular líquidos para formar o deshacer mezclas.

Los envases de aluminio se consideran materia prima en los mercados internacionales. Su reciclado supone un elevado ahorro energético y los materiales obtenidos mantienen sus propiedades al fundirse repetidas veces. Para separarlos del resto se utiliza un mecanismo denominado de corrientes inducidas de Foucault<sup>5</sup> que proyecta hacia fuera de la cinta transportando los envases de aluminio, pega a ésta los férricos y deja igual a los demás. En combinación con sistemas de electroimanes sirve para completar la separación de los metales.

### *Otros residuos*

Los neumáticos pueden sufrir diferentes procesos:

- Recauchutado, con lo que puede volver a utilizarse. Consiste en volver a realizar el dibujo gastado
- Corte. Para que mediante un fundido a presión se puedan fabricar felpudos, zapatillas, etc.
- Trituración. Con dos variantes:
  - Trituración a temperatura ambiente
  - Trituración criogénica. Ésta última utiliza bajas temperaturas por debajo de su temperatura de transición vítrea convirtiéndolo en un material frágil y quebradizo. Se obtiene así un grano fino y homogéneo

El triturado se emplea como:

- Caucho asfáltico. Mejora el drenaje de la capa asfáltica así como prolonga la duración del pavimento y reduce su fragilidad
- Hormigón de asfalto modificado
- Combustible en grano. El caucho compuesto por un 83% de carbono en peso tiene una capacidad calorífica de 35 MJ/kg. La combustión debe estar muy controlada porque los neumáticos contienen azufre
- Utilización en el sistema de compost de fangos. El neumático triturado se utiliza para favorecer la oxigenación y el compost

Los aceites de automoción usados son residuos peligrosos. Contienen productos de la degradación de los aditivos que se les añaden como fenoles, compuestos de cloro, hidrocarburos polinucleares aromáticos clorados (Hidrofluorocarbonos HF<sup>6</sup>), compuestos de plomo, etc. Son procesados por destilación que permiten obtener nuevamente aceites de una calidad comparable a los obtenidos del crudo.

Por último los residuos voluminosos como muebles, electrodomésticos son recuperados por particulares y asociaciones que los reparan y revenden o utilizan. Se debe tener en cuenta que ciertos electrodomésticos de línea blanca como frigoríficos deben tratarse para su desguace por personal especializado por contener clorofluorocarbonos (CFC) de diversos tipos. Igualmente el material electrónico debe ser tratado de forma especial para evitar que dañe el medio ambiente (SEMARNAT-INE, 2006).

---

<sup>5</sup> El principio físico que produce la repulsión de las latas de aluminio se relaciona a la inducción electromagnética. Una corriente es inducida en la lata, por el campo magnético de la máquina, que al estar en movimiento produce una fuerza de repulsión que hace que se salte. Los materiales ferrosos se adhieren a la banda y los no ferrosos son los que saltan fuera de ella.

Por su parte, los materiales orgánicos se pueden someter a dos clases de procesos:

- Proceso anaerobio. Metanización
- Proceso aerobio. Proceso de compost

El primero, denominado también tratamiento anaerobio, es un proceso biológico acelerado artificialmente, que tiene lugar en condiciones muy pobres de oxígeno o en su ausencia total, sobre sustratos orgánicos. Como resultado se obtiene una mezcla de gases formada por un 60% de metano, 40% dióxido de carbono y un 1% de amoníaco y ácido sulfhídrico. El gas combustible, metano, permite obtener energía.

El sistema de compost es la transformación biológica de la materia orgánica en productos húmicos conocidos como compost y que se emplean como fertilizante. Se realiza en presencia de oxígeno y en condiciones de humedad, pH y temperatura controlados (GTZ, 2006).

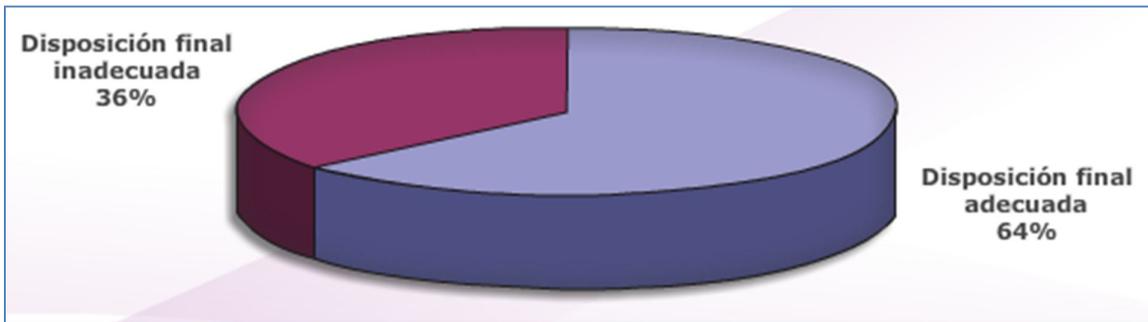
En el primer caso es preciso haber separado previamente la materia orgánica para que no presente ninguna clase de impurezas ni lleve restos de medicinas, sustancias tóxicas, etc.

En primer lugar se procede a su molido y después se dispone en hileras de dos metros y medio a cielo abierto. Las pilas son volteadas periódicamente con el fin de facilitar la oxigenación y evitar su fermentación anaerobia. El volteo llega a hacerse hasta dos veces por semana mientras la temperatura se mantiene alrededor de 55°C y el grado de humedad de la hilera es de entre el 50% y el 60% (Widman y col., 2005).

A partir del tercer volteo, la temperatura se mantiene en los 25°C indicando que ya ha finalizado la fermentación. Ésto ocurre transcurridas tres o cuatro semanas. Después se deja otro periodo equivalente para que se cure y luego proceder a su afino, para retirar cualquier clase de impureza (partículas metálicas, trozos de vidrio, etc.) que pudiera haber quedado. Existen otras variantes a cielo abierto como la pila estática aireada. Por último, se han desarrollado sistemas de cubierta con el fin de optimizar el proceso y sobre todo evitar malos olores.

#### **1.4.2 Rellenos sanitarios**

En el país existen 2,445 municipios, de los cuales se sabe que menos del 5% tienen un manejo adecuado de sus residuos. Se estima que sólo se recolecta el 87% del peso que se genera. En México, existen sólo 114 rellenos sanitarios y 24 sitios controlados por lo que solamente el 64% de los residuos tiene una disposición final adecuada (Figura 1.10) y 37 mil toneladas diarias se disponen en barrancas, lotes baldíos, cuevas y terrenos no adecuados (SEGEM, 2002).



**Figura 1.10 Disposición de residuos en México  
(SEMARNAT, 2010)**

Existen 4 tipos comunes de rellenos sanitarios en el mundo y a continuación se detallan las características que los distinguen.

1.- Relleno sanitario tradicional (húmedo). Esta tecnología consiste en la disposición final de los residuos generados por comunidades urbanas y rurales a nivel municipal de tal forma que la disposición final en el suelo no cause perjuicio al medio ambiente y molestias o peligros para la salud y seguridad pública. Se colocan los residuos en celdas o capas compactadas, cubiertas con tierra arcillosa, utilizando maquinaria pesada para la distribución, homogeneización y compactación. Antes de comenzar la operación se prepara el sitio para evitar al máximo la infiltración de lixiviados en el suelo. Es posible utilizar una geomembrana que es una placa de plástico de alta densidad o se compacta el suelo original que debe ser de tipo arcilla o tepetate lo que cuenta con un factor alto de protección y baja permeabilidad. Al mismo tiempo se construyen obras adyacentes de control y monitoreo como pozos de venteo, de observación de agua subterránea e instalaciones para la recolección y tratamiento de lixiviados.

2.- Relleno sanitario con pre-tratamiento de alta compactación (seco). Su principal objetivo es acelerar y facilitar el control de los rellenos sanitarios a través de la reducción del volumen con una prensa embaladora. El tratamiento puede contener varios procesos adicionales como selección manual o totalmente automatizada hasta el encapsulamiento de las pacas, con plásticos los cuales pueden adaptarse a las necesidades locales, a la variación de la cantidad y las propiedades de los residuos. Aumenta al doble la vida útil de un relleno húmedo, disminuye en un 75% la cantidad de material de cobertura, se reduce la dispersión de plagas y materiales ligeros, facilita el manejo, reduce problemas de hundimiento, puede inhibir la degradación biológica, reduce la cantidad de operadores en el sitio pero se compensa con los que deben incluirse en la compactación y sigue necesitando los sistemas de monitoreo y control de lixiviados y gas

3.- Relleno con pre-tratamiento mecánico biológico. La estabilización de los rellenos convencionales puede llevarse a cabo en 25 años y en rellenos secos hasta 100 años. Para que el periodo de monitoreo no deba extenderse tanto tiempo se debe minimizar el potencial contaminante de los mismos antes de disponerlos y la forma de lograrlo es extraer al máximo los materiales orgánicos convirtiéndolos en material inerte. El tratamiento consiste en dos etapas: Mecánico para acondicionar los residuos y biológico para la estabilización de los mismos. El tratamiento acelera (hasta 5 años de monitoreo) y facilita el control de los rellenos a través de la reducción de volumen (50-70%), cantidad y calidad de lixiviados (20-40% de la DBO original y emisión de biogás (1-5% del teórico total).

4.- Relleno sanitario manual. Ésta técnica constituye una alternativa apropiada para el manejo ambiental de los residuos sólidos de menos de 40,000 habitantes, que no pueden adquirir el equipo necesario para un relleno mecanizado. Cuenta con cerco perimetral, drenaje periférico para la desviación de aguas pluviales, impermeabilización, drenaje de lixiviados, sistema de evacuación de biogás y casetas de vigilancia. Virtualmente es apto por los bajos costos de operación y menor inversión inicial pero se crean problemas para controlar la vida útil del relleno cuando no se cuenta con la experiencia necesaria para controlar la entrada de los RSU (UNEP, 2009).



**Figura 1.11 Preparación de un sitio de disposición  
(SEGEM, 2003)**

Según la NOM-083-SEMARNAT-2003 (Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de selección de sitio, el diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura, y obras complementarias de un sitio de disposición final) la disposición final es la acción de depositar o confinar permanentemente residuos en sitios e instalaciones cuyas características permitan prevenir su liberación al ambiente y las consecuentes afectaciones de la salud de las personas y ecosistemas. Este método consiste en depositar en el suelo los desechos sólidos, los cuales se esparcen y compactan reduciéndolos al menor volumen posible para que así ocupen un área pequeña. Luego se cubren con una capa de tierra y se compactan nuevamente al terminar el día.

Según la clasificación de la NOM-083 existen tres alternativas para la disposición final, contempladas por el estado, los sitios no controlados, los controlados y los rellenos sanitarios. Los últimos cumplen con los requisitos de obra de infraestructura y operación, así como con la impermeabilización a diferencia de los sitios controlados que sólo cumplen con las dos primeras. Los sitios no controlados o "tiraderos a cielo abierto" son inadecuados y no cumplen con ninguna normatividad.

Para construir un relleno sanitario es importante seleccionar el terreno que reúna condiciones técnicas adecuadas como son: Topografía, tipo de suelo, nivel a que se encuentran las aguas subterráneas y disponibilidad de material para cubrir la basura.

El relleno debe contar con (SEGEM, 2003):

- Una buena compactación de los desechos, antes y después de cubrirlos con tierra.
- Cubrimiento diario de la basura con una capa de tierra especial o un material que cumpla con las especificaciones de la norma.
- Controlar con drenajes y otras técnicas los líquidos o lixiviados y los gases que produce el relleno, para mantener las mejores condiciones de operación y proteger el ambiente.
- Evitar por medio de canales y drenajes que el agua de lluvia ingrese al relleno sanitario.
- Una supervisión constante, tanto de los administradores como de las organizaciones comunales.
- Monitoreo de los mantos acuíferos.
- Monitoreo de los residuos entrantes al relleno, cantidades y características.
- Sistemas de administración para evitar la entrada de residuos peligrosos.

Algunos de los beneficios asociados con la disposición final de los residuos son (SEGEM, 2002):

- Los residuos sólidos urbanos diariamente son compactados y cubiertos con tierra, lo que impide la anidación de especies consideradas plagas, como ratas, cucarachas, moscas, etc. La compactación y cubierta impide que el viento disperse al aire partículas contaminantes.
- El suelo donde se construya el relleno sanitario es protegido con diferentes capas de materiales impermeables, que impiden la filtración de lixiviados tóxicos y su derivación a pozos o lagunas de monitoreo y control.
- El calor y la presión alta provocarán la producción de gases (metano principalmente), que puede ser utilizado para producción de energía eléctrica y combustible para otras necesidades mismas de operación del relleno sanitario.

Los rellenos sanitarios tienen las siguientes implicaciones que se derivan de la falta de atención en las etapas iniciales del proceso de gestión adecuado (CEPIS, 1996):

- Se depositan residuos y desperdicios que podrían ser utilizados para la industria del reciclaje.
- Su correcta operación y mantenimiento es costosa. El mínimo error o descuido, puede provocar contaminación y generará más costos para su remediación.
- Después de su clausura, se tendrá que monitorear hasta por 50 años para garantizar que no hay escape de contaminantes al suelo, aire y cuerpos de agua subterráneos o superficiales que se encuentren cerca.
- Una vez clausurado, tiene que pasar un periodo de mínimo 20 años para que el "terreno" pueda usarse; solo podrán construirse jardines, algunas especies de árboles, pero no casas, edificios ni producir cultivos o especies agrícolas.
- Los lixiviados se vuelven líquidos tóxicos, prácticamente imposibles de tratar.

Es por esto que la investigación se centra en el desarrollo e implantación de tecnología para ofrecer un adecuado tratamiento de los residuos, con el fin de aprovecharlos y reducir la cantidad que llega a los rellenos sanitarios para aumentar su vida útil, facilitar su operación y reducir las implicaciones ambientales que generan y los riesgos asociados.

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTOS

#### 2.1 Digestores

El sistema de tratamiento anaerobio es un proceso natural mediante el cual la naturaleza regresa hacia la tierra, los recursos contenidos en los residuos de la materia orgánica, a través del tiempo de manera natural (CEPIS, 1996).

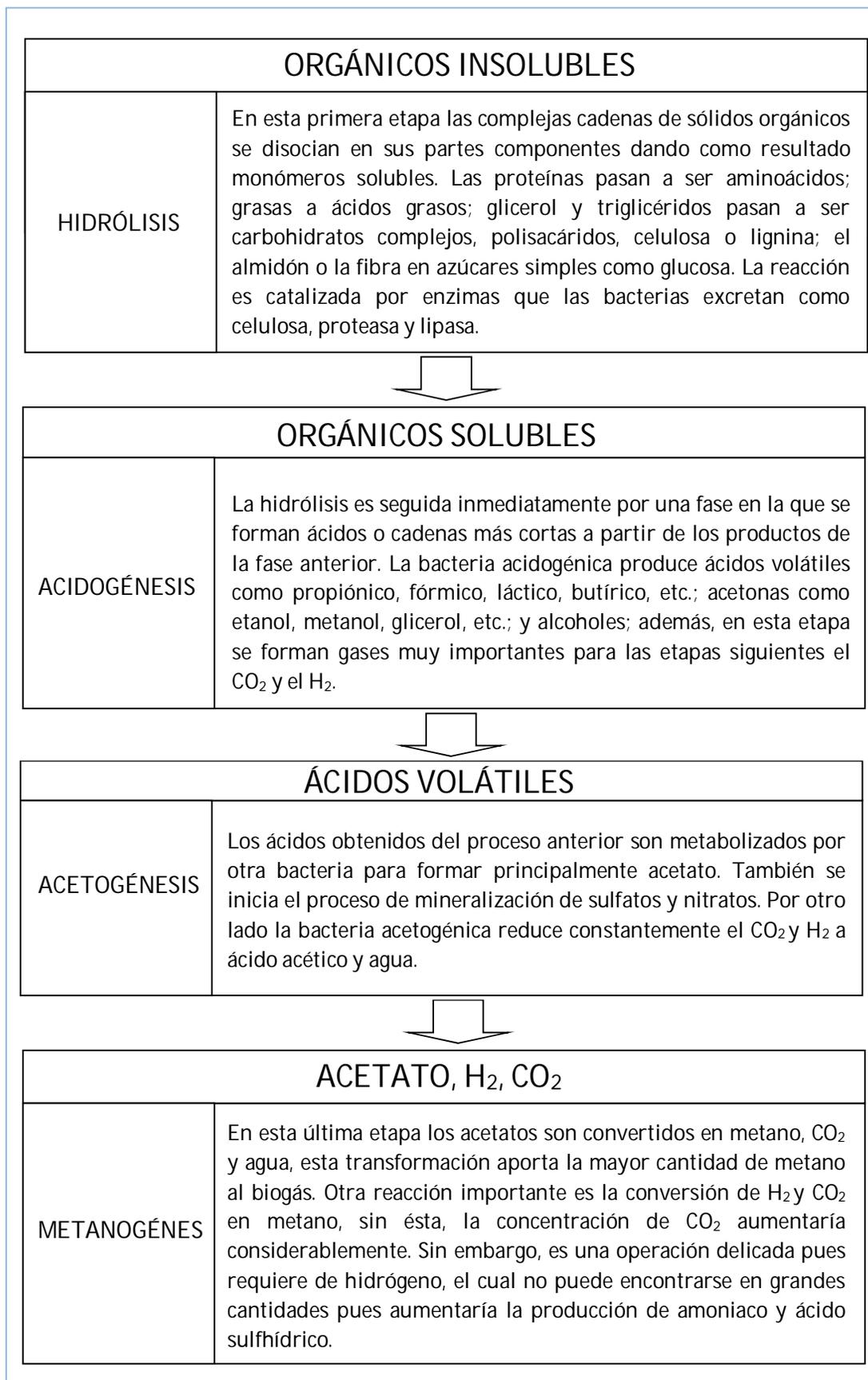
El tratamiento anaerobio es un proceso natural microbiano que ocurre en forma espontánea en la biomasa en ausencia de oxígeno. Genera una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como biogás y una suspensión acuosa (abono orgánico) que contiene los componentes no degradados o parcialmente degradados y restos inorgánicos inicialmente presentes en la biomasa (ADA, 2008).

Una fórmula aproximada de los residuos sólidos domiciliarios es  $C_6H_{10}O_4$  y partiendo de ésta como sustrato, las reacciones químicas subsecuentes serán (Ostrem, 2004):

1. Hidrólisis
  - a.  $C_6H_{10}O_4 + H_2O \rightarrow C_6H_{10}O_6 + 2H_2$
2. Acidogénesis
  - a.  $C_6H_{10}O_6 \leftrightarrow 2CH_3CH_2OH + CO_2$
  - b.  $C_6H_{10}O_6 + 2H_2 \leftrightarrow 2CH_3CH_2COOH + 2H_2O$
3. Acetogénesis
  - a.  $CH_3CH_2COO^- + 3H_2O \rightarrow CH_3COO + H^+ + HCO_3^- + 3H_2$   
Otras reacciones importantes en la misma fase
  - b.  $C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \leftrightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2 + 4H_2$
  - c.  $CH_3CH_2OH + 2H_2O \leftrightarrow CH_3CH_2COO + 2H_2 + H^+$
  - d.  $2HCO_3^- + 4H_2 + H^+ \leftrightarrow CH_3COO + 4H_2O$
4. Metanogénesis
  - a.  $2CH_3CH_2OH + CO_2 \leftrightarrow 2CH_3COOH + CH_4$
  - b.  $CH_3COOH \leftrightarrow CH_4 + CO_2$
  - c.  $CH_3OH + H_2 \leftrightarrow CH_4 + 2H_2O$
  - d.  $CO_2 + 4H_2 \leftrightarrow CH_4 + 2H_2O$   
Mineralización de Azufre y Nitrógeno
  - e.  $CH_3COO + SO_4 + H \rightarrow 2HCO_3^- + H_2S$
  - f.  $CH_3COO + NO + H_2O \rightarrow 2HCO_3^- + NH_4$

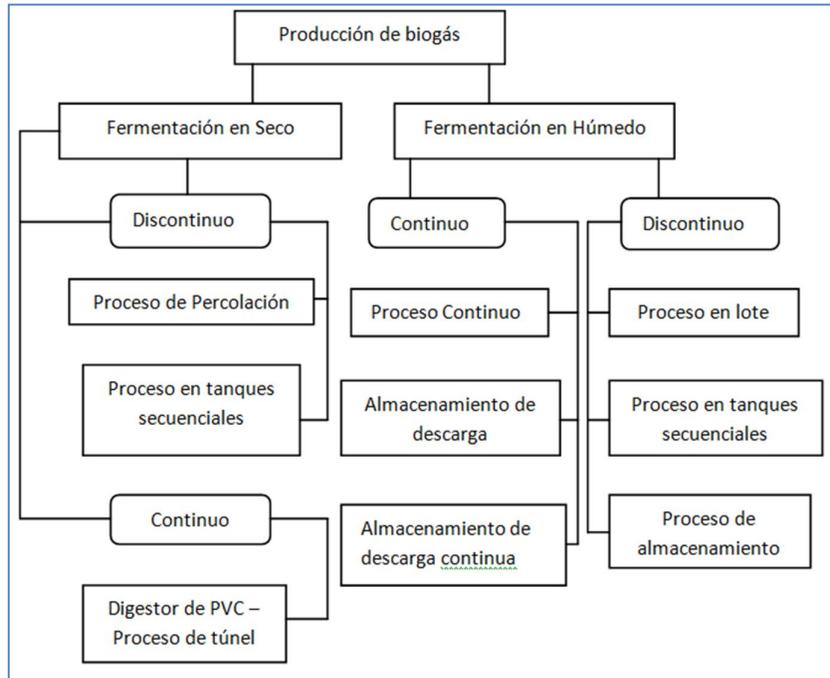
En la Figura 2.1 se explica con más detalle cada una de las etapas del proceso del tratamiento anaerobio. Los digestores son depósitos o tanques cerrados herméticamente. A grandes rasgos se pueden definir como recipientes o tanques que permiten la carga (influyente) de sustratos y descarga (efluente) de abono-biol y poseen un sistema de recolección y almacenamiento de biogás para su aprovechamiento energético.

Los digestores se clasifican por el proceso o modo de operación, llenado y vaciado. La clasificación general los define en digestores de régimen estacionario o lotes, de régimen semi-continuo, horizontales de desplazamiento y de régimen continuo.



**Figura 2.1 Etapas del proceso de tratamiento anaerobio (Monroy y col., 1998)**

En el diagrama de la Figura 2.2 se expone la clasificación general de los digestores por su forma de operación. La fermentación en húmedo es la más utilizada en Europa y latino América.



**Figura 2.2 Clasificación general de los digestores (Speece, 1983)**

*Digestores en operación intermitente*

Se cargan una vez en forma total o por intervalos durante varios días. La descarga se efectúa cuando se ha degradado la totalidad de la materia orgánica y ya no se produce biogás.

Es aplicable cuando se presenten problemas operativos (falta de personal) o cuando la materia orgánica no existe en forma continua. Pueden procesar una gran variedad de materiales. La carga puede acopiarse en campo abierto porque, aunque tenga tierra u otro inorgánico mezclado, no entorpece la operación del digestor. Su trabajo en ciclos, los hace especialmente aptos para los casos en que la disponibilidad de la materia prima no sea continua, sino periódica. No requiere prácticamente ninguna atención diaria. Las principales desventajas son: La carga y descarga requiere un considerable y paciente trabajo.

*Digestores horizontales o de desplazamiento*

Generalmente se construyen enterrados, son poco profundos y alargados, asemejando un canal. Utilizan el sistema de operación semi-continuo, entrando la carga por un lado y saliendo el lodo por el otro extremo de tal forma que la biomasa pasa el tiempo de retención hidráulico al tiempo que avanza en la carrera del tanque (Figura 2.3).



**Figura 2.3 Digester horizontal  
(Ostrem, 2004)**

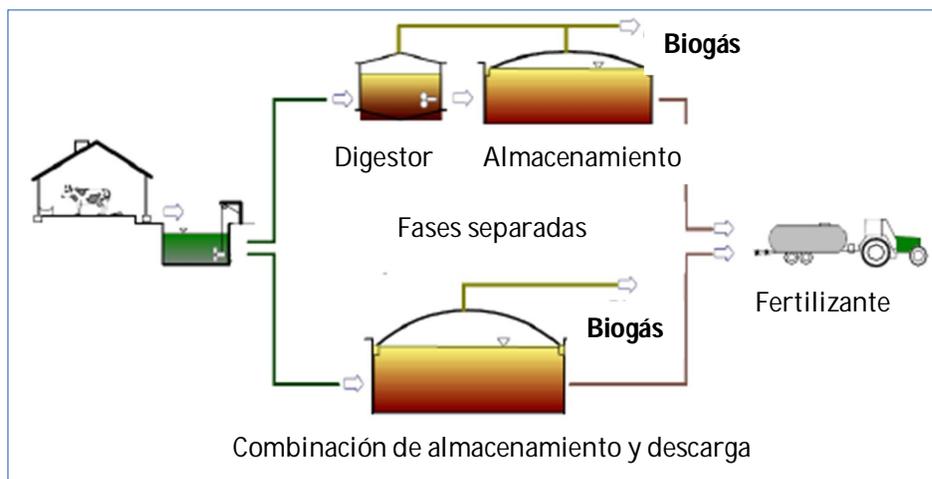
*Digestores de régimen semi-continuo*

Se utilizan generalmente en áreas rurales y en pequeñas granjas agrícolas. Son sistemas de uso doméstico. Se cargan por gravedad una vez al día con volúmenes de mezcla que dependen del tiempo de retención. Producen una cantidad de biogás y fertilizante constante durante todo el día.

*Digestores de régimen continuo*

Este tipo de digester se desarrolló principalmente para el tratamiento de aguas residuales y en la actualidad su uso se ha extendido al manejo de todo tipo de sustratos (Figura 2.4). Se les utiliza para plantas de biogás para la producción de energía eléctrica. Son digestores de gran tamaño en los que se emplean equipos comerciales para su alimentación, para la agitación y control. Este tipo de digester es el más utilizado en Europa y en plantas industriales en Latinoamérica. Éstas, se cargan diariamente en forma periódica, la biomasa debe ser fluida y homogénea y se pueden automatizar con facilidad.

Este tipo de digester permite controlar la digestión, con el grado de precisión que se quiera. Permite corregir cualquier anomalía que se presente en el proceso, en cuanto es detectada. Permite manejar las variables relacionadas, carga orgánica volumétrica, tiempo de retención y temperatura, a largos periodos. La tarea de “puesta en marcha” sólo se vuelve a repetir cuando hay que vaciarlo por razones de mantenimiento. Las operaciones de carga y descarga de biomasa y fertilizante no requieren ninguna operación especial.



**Figura 2.4 Flujo esquemático de digestores para el tratamiento de desecho  
(De Baere y Matheeuws, 2004)**

### *Digestores completamente mezclados*

A diferencia de los anteriores, estos sistemas requieren menores tiempos de retención (10 a 30 días). Son aplicados a residuos con alto porcentaje de sólidos totales, a fin de lograr un mayor contacto entre la población microbiana y el sustrato en cuestión. Las principales desventajas de estos digestores la constituyen las bajas velocidades de carga con que pueden ser operados, los relativamente altos tiempos de retención requeridos, unidos con la complejidad del sistema de mezclado, sobre todo en su construcción y mantenimiento. Este tipo de digestores se les construye en acero u hormigón (Figura 2.5). Son mezclados por agitadores y trabajan en rangos de temperatura mesofílica y termofílica, así se utilizan muy eficientemente para degradar desechos sólidos. Tienen altos costos de construcción y operación pero un elevado rendimiento de metano. La mayoría de las plantas industriales para la producción de biogás que se construyen en Europa se basan en este sistema.

### *Digestores de dos etapas*

Existen múltiples combinaciones de digestores de dos etapas. La concentración de estos sistemas está basada en el hecho de que varios grupos de bacterias involucradas en el proceso de descomposición de la materia orgánica compleja requieren de diferentes condiciones de pH y tiempo de retención para su óptimo crecimiento. En estos sistemas, en el primer digestor ocurre la hidrólisis y acidogénesis de la materia orgánica compleja, mientras que en el segundo se realizan la acetogénesis y metanogénesis del material acidificado. Como desventaja de este sistema son los largos tiempos de retención hidráulicos, requeridos en la primera fase del tratamiento y las bajas eficiencias de conversión (Figura 2.6).

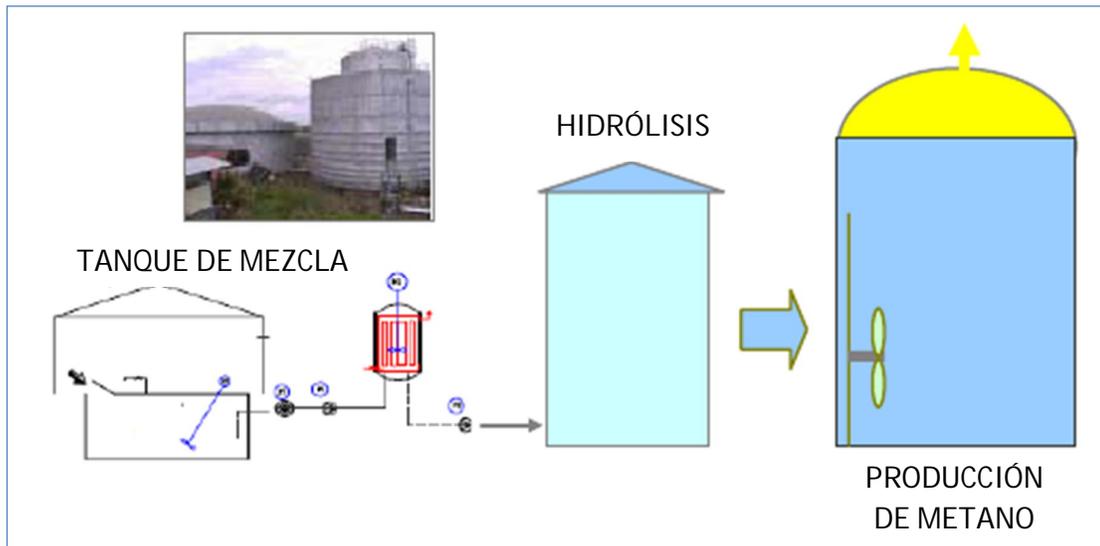


**Figura 2.5 Digestor completamente mezclado**  
(Ostrem, 2004)

### *Digestión seca*

Este tipo de digestión es referida al proceso de degradación de residuos orgánicos de sólidos totales del orden del 20% o superiores. La definición "seca" no es técnicamente muy clara ya que siempre se utiliza un medio acuoso para el tratamiento anaerobio. Las principales ventajas de este sistema son los bajos consumos de agua. Solamente se requiere una mínima cantidad de agua para llevar a cabo el proceso. El volumen del digestor es relativamente pequeño, debido a una alta densidad de la materia orgánica con

la que es operado. Los requerimientos energéticos, con el fin de mantener una temperatura controlada del sistema son bajos (producción endógena).



**Figura 2.6 Distribución de operaciones unitarias en un digestor de dos etapas (Ostrem, 2004)**

## 2.2 Experiencias internacionales y nacionales

Existe evidencia de la utilización del biogás que data del décimo siglo a. C.; donde éste era utilizado para calentar agua de baño en Asiria y en Persia en el siglo XVI. Jan Baptita Van Helmont determinó en el siglo XVII que una especie de gas inflamable emanaba de la materia orgánica en descomposición. Alessandro Volta determinó en 1776 que existía una relación directa entre la cantidad de residuos en descomposición y la cantidad de biogás generado. En 1808 Sir Humphry Davy probó que el metano estaba presente en el biogás que emanaba de los residuos en descomposición.

La primera planta de digestión fue construida en una colonia de Bombay, India en 1859. El desarrollo de la microbiología como ciencia hizo posible que Buswell y otros identificaran la bacteria anaerobia y las condiciones para producir metano. Después de la Segunda Guerra Mundial el uso del tratamiento anaerobio para producir energía comenzó a tomar fuerza debido al deficiente suministro de energía.

En 1999, la Unión Europea (UE) adoptó la Ley del Consejo Directivo 99/31/EC la cual entró en vigor en el 2001, que consiste en que la fracción orgánica de los residuos deberá ser reducida en 65%, respecto a lo dispuesto en rellenos en 1995, en los próximos 15 años.

Además en el Artículo 6° se dice los residuos que se dispongan deben ser tratados, con la excepción de los materiales inertes, por no ser factible su aprovechamiento. Cada país de la UE está sujeto a estos estándares como requerimientos mínimos, pero en la práctica, Alemania, Austria, Dinamarca, Luxemburgo, Holanda y Bélgica ya se habían impuesto restricciones más estrictas y ahora sobrepasan la ley, mientras que Francia, Italia, Suecia, Inglaterra y Finlandia están en la actualidad llegando a los objetivos. Grecia, Irlanda, Portugal y España, iniciaron el proceso de mejorar sus instalaciones a partir del 2004.

Como consecuencia, la capacidad instalada en Europa para la tecnología de la degradación anaerobia se ha incrementado considerablemente y hoy en día es de 4 millones de toneladas al año. Un caso muy notable, es el de España que en los últimos años ha instalado diversas plantas de gran escala para procesar cerca de 1 millón de toneladas anualmente lo que significa el 50% de los residuos orgánicos producidos en el país.

En Alemania, la ley de reciclaje y residuos fijó límites muy estrictos para la composición de los RSU tratados, antes de ser dispuestos en rellenos. Por ejemplo, el carbón orgánico total y la energía contenidos permitidos para la disposición de residuos son de 18% y 6,000 kJ/kg, respectivamente.

Al 2006 existían en Europa, 124 plantas con capacidad para tratar 3,300 ton/año de sustratos compuestos por un mínimo de 10% de RSU. La capacidad total combinada es de 4.3 millones de toneladas anualmente lo que equivale al doble del número de plantas y cuatro veces la capacidad que existía en el 2000. Así mismo entre los años de 2001-2005 se incrementó notablemente el tamaño de la capacidad media de las plantas instaladas a un promedio de 43,000 ton/año (De Baere, 2006).

Finalmente, una empresa de servicios ambientales Israelí llamada Arrow Ecology patentó una tecnología de separación y digestión de dos fases con el nombre comercial de ArrowBio. Al poco tiempo las ciudades de Coachella y Santa Bárbara se enlistaron para adoptar esta tecnología, tiempo después de que se inauguró una planta con capacidad de 88,000 ton/año en la ciudad de Tel Aviv en 2002, la cual produce entre 2-3 MW de energía eléctrica. Así pues, fueron programadas inversiones para México, Australia y Escocia (Oleszkiewicz y Poggi-Varaldo, 1998).

El uso de la degradación anaerobia comenzó tarde en México, en comparación con los países europeos y aún con nuestros vecinos norteamericanos, adicionalmente sólo se desarrolló con gran aceptación en el tratamiento de aguas residuales. El primer reactor de este tipo se construyó en 1987 y el crecimiento fue lento, pues al año de 1991 sólo se construían de 1 a 4 por año. Afortunadamente en 1992 ya se había incrementado en un 400% la cantidad y se había llegado a 16 digestores. Durante los dos años siguientes la velocidad de construcción se mantuvo por encima de 10 plantas por año, llegando a un máximo de 19 en 1993. Lamentablemente esta tasa decreció enormemente debido a la crisis de 1994 y la devaluación de la moneda nacional (Monroy y col., 1998).

En 1998, se contaba con una capacidad instalada de 85 reactores anaerobios en México tratando un volumen de 2.5 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales y 590 ton DQO/día (equivalente a 12.3 millones de habitantes, considerando que 160L/hab•día y 300 mg DQO/L). Ésto es el 0.62% de las aguas residuales generadas y el 3.69% de las aguas residuales tratadas (5.5% de las industriales y 2.93% de las municipales) después de ésto el crecimiento se ha focalizado en el tratamiento de los residuos de granjas, establos, centrales de abasto y por su puesto basura urbana (Degan y col., 2010).

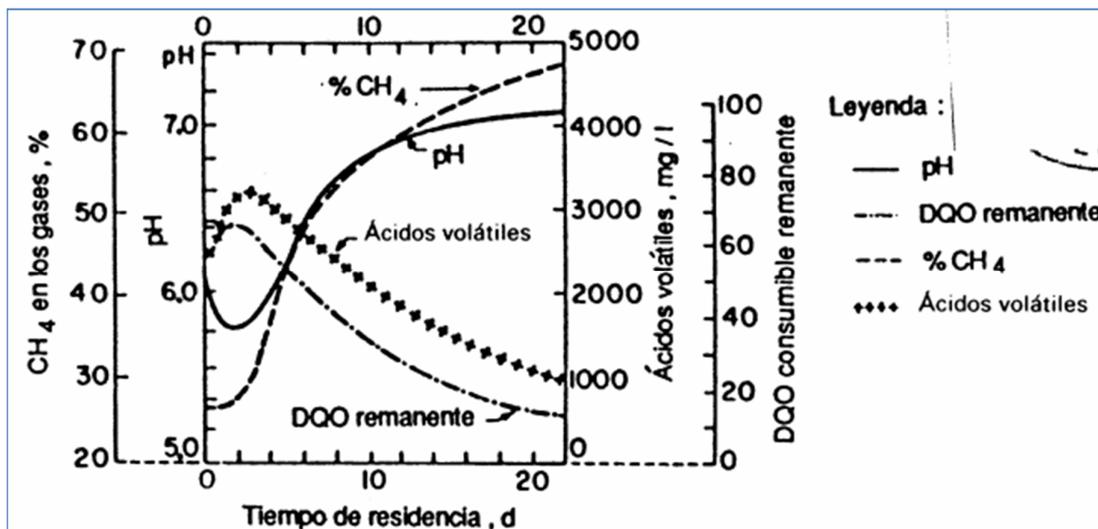
### **2.3 Factores para el diseño y operación de una planta de biogás**

La actividad metabólica involucrada en el proceso de producción de gas metano se ve afectada por diversos factores y entre los más importantes se tienen los siguientes:

- Ausencia de oxígeno
- Tipo de biomasa (nutrientes disponibles)
- Nutrientes
- Relación Carbono/Nitrógeno
- Grado de mezclado de la biomasa

- Tiempo de retención hidráulica
- Inóculo
- Presencia de compuestos inhibidores del proceso
- Masa seca (MS). La masa seca se define como la cantidad de sólidos que contiene la biomasa.
- Masa volátil (MV). Es el volumen de masa orgánica que contiene la biomasa.
- Carga orgánica volumétrica (COV). Es la cantidad de materia orgánica seca (MS) con la que se alimenta diariamente al digestor por m<sup>3</sup> de volumen de digestor.
- Tiempo de retención hidráulica (TRH). Es el tiempo de permanencia de la biomasa en el digestor. Este valor depende de la temperatura ambiental y la carga orgánica. Existe una relación inversamente proporcional entre la degradabilidad de la materia orgánica y el TRH del digestor.
- Temperatura del proceso. Existen tres rangos de temperatura adecuados para digestión anaerobia asociado con la naturaleza de las bacterias. Un rango psicrófilico (por debajo de 25°C), mesófilico (entre 25 y 45°C) y otro termófilico (46 a 60°C).
- Acidez. Es uno de los parámetros de control más importantes, debido a que los microorganismos metanogénicos presentan una gran sensibilidad a las variaciones del mismo. Si el valor del pH se mantiene entre 6.5 y 7.5 se consigue un buen rendimiento de degradación y una elevada concentración de metano.

La variación de los parámetros antes mencionados, en función del tiempo de retención dentro de un reactor anaerobio, pueden verse en la Figura 2.7.



**Figura 2.7 Variación de los principales parámetros del tratamiento anaerobio (Ramalho, 1996)**

La degradación anaerobia de residuos orgánicos municipales ha sido estudiada extensamente en relación con los desperdicios vegetales debido a sus grandes similitudes. Los excelentes resultados que se han obtenido de la digestión de vegetales y residuos agroindustriales son válidos en general, cuando el contenido de lignina de los RSU no es muy alto. De hecho, ya ha sido indiscutiblemente demostrado que un contenido de 15%, en peso, de lignina inhibe enormemente la digestión (Pfeffer y Khan, 1976).

El contenido de masa volátil (MS) en una mezcla de biomasa tiene también influencia en la producción de biogás. Si este valor es muy elevado las bacterias no tienen espacio para moverse y crecer por lo que solo degradan la materia presente en su reducido espacio. Si el contenido de MS alcanza valores del 40% o más puede ocurrir el colapso del proceso, ya que en este caso no existe la suficiente humedad para que se desarrolle el proceso anaerobio. Por otro lado también pueden ocurrir problemas con elementos inhibidores del proceso, ya que estos existirían en una concentración muy elevada. La producción de biogás también dependerá del grado de homogenización y mezcla de la biomasa. A mayor mezcla y agitación, mayor será la producción de biogás (Degan y col., 2010).

En la Tabla 2.1 se indican los rangos de valores que deben tener ciertos parámetros necesarios para una óptima digestión de biomasa.

**Tabla 2.1 Valores mínimos de parámetros físicos y químicos necesarios para la degradación anaerobia de desechos sólidos municipales (Peres y col., 1992)**

Parámetros	Medida
pH	6.5 – 8.0
Contenido de sales/Conductividad	2.5 hasta 25 mS/cm
Temperatura	8 hasta 55 °C
Oxígeno	<1 ppm
Hidrógeno	6 ppm
Carbono total	0.2 hasta 50 g DQO/L
Sodio	45 hasta 200 ppm
Potasio	75 hasta 250 ppm
Magnesio	10 hasta 40 ppm
Azufre	50 hasta 100 ppm
Hierro	10 hasta 200 ppm
Níquel	0.5 hasta 30 ppm
Cobalto	0.5 hasta 20 ppm
Molibdeno, Wolframio, Selenio	0.1 hasta 0.35 ppm
Cinc	0 bis 3 ppm
Fosfato	50 bis 150 ppm

En la Tabla 2.2 se exponen los resultados de una investigación realizada en la India para determinar la producción de biogás respecto de los desechos orgánicos de hortalizas.

**Tabla 2.2 Carga orgánica de los residuos líquidos de diversos procesos de la industria de hortalizas (Sundararajan y col., 1997)**

Procesamiento de hortalizas	Volumen de residuos m <sup>3</sup> /ton materia prima	Kg DBO /ton materia prima	Kg SST/ton materia prima
Espárragos	68.8	2.1	3.4
Brócolis	45.6	9.8	5.6
Col bruselas	36.3	3.4	10.8
Zanahorias	12.1	19.5	12.0
Coliflores	89.4	5.2	2.7
En conserva	4.5	14.4	6.7
Congelado	13.3	20.2	5.6
Habas	27.1	13.9	10.3
Todos los productos	10.3	18.1	15.9
Productos congelados	11.3	22.9	19.4

Los desechos de las procesadoras de frutas tienen un alto contenido de carga orgánica que puede aprovecharse en digestores para la producción de biogás. En la Tabla 2.3 se presentan los contenidos de masa orgánica que se pueden obtener del proceso de varios tipos de frutas.

**Tabla 2.3 Carga orgánica de los residuos líquidos de diversos procesos de la industria frutera (Mata-Álvarez y col., 1992)**

Procesamiento de frutas	Volumen residuos m <sup>3</sup> /ton materia prima	Kg DBO/ton materia prima	Kg SST/ton materia prima
Damascos	29.1	15.4	4.25
Todos los productos	3.7	5	0.5
Todos excepto jugos	5.4	6.4	0.8
Jugos	2.9	2	0.3
Cítricos	10.1	3.2	1.3

Se han realizado incontables estudios sobre la relación entre la producción de biogás y las proporciones de humedad que se mantienen dentro del proceso. El proceso seco (por encima 15% de contenido de sólidos totales), tiene menos sensibilidad a la entrada de material no digerible debido a que no existe una segregación homogénea de las mismas, en contraste, estas condiciones no alcanzan remociones tan altas como los procesos húmedos (Capela y col., 2008).

## **2.4 Diseño de plantas de biogás**

Uno de los objetivos centrales del uso del sistema anaerobio para el tratamiento de residuos es la obtención de biogás con un poder calorífico que haga posible su uso como combustible, sin embargo esta tecnología no es tan reciente como se cree.

Es bien sabido que el desempeño de un digestor es altamente sensible a la calidad del sustrato alimentado, la producción y la cinética de las reacciones biológicas dependen fuertemente de la composición de los residuos. Por ejemplo, la degradación de residuos separados desde las fuentes es de 5-10 veces mayor que la de los residuos separados mecánicamente, mientras que la producción de biogás es 2.5 veces mayor (Mata-Álvarez y col., 1992).

La producción de biogás la determina el contenido de proteínas, hidratos de carbono y gases que forman la biomasa o los sustratos que se co-digestionan. La mayor cantidad de biogás se obtiene de las grasas, pero el mayor % de gas metano se obtiene de las proteínas (71%). La menor producción de metano se obtiene de los hidratos de carbono. Por estas razones es muy importante lograr una mezcla de sustratos equilibrada en donde se produzca la mayor cantidad de biogás, pero también el mayor contenido porcentual de gas metano.

La producción de biogás en un digestor involucra una serie de procesos interrelacionados que comprende toda la gestión, desde el suministro de sustrato o biomasa hasta su aprovechamiento.

Está comprobado que todos los desechos orgánicos pueden producir biogás en mayor o menor grado (Figura 2.8). La producción de biogás de un determinado desecho depende de su composición físico química y en particular del contenido de carbonos, grasas, proteínas, etc. (Figura 2.9). Depende también de las características de la biomasa mezclada con la que se alimenta el digestor.

Se sabe que la reducción del tamaño de partículas genera un incremento en la superficie de contacto para el proceso. Dos efectos han sido probados: El primero, se presenta en sustratos con alto contenido de fibra y baja degradabilidad, la molienda o trituración ha demostrado mejorar la producción de biogás. Por otro lado, la reducción del tamaño de partículas indudablemente acelera la digestión, como lo han demostrado varias pruebas de maceración del sustrato, de hecho un incremento récord de 20% de producción de biogás con partículas de menos de 0.35mm, sin embargo no se han encontrado grandes diferencias con tamaños de 5-20 mm. Se han probado varios pre-tratamientos químicos como por ejemplo la aplicación de NaOH o NH<sub>4</sub>OH y también la combinación de éstos con los tratamientos mecánicos, sin encontrar aumentos en la producción de biogás que valgan la pena (Palmowski y Müller, 2000).

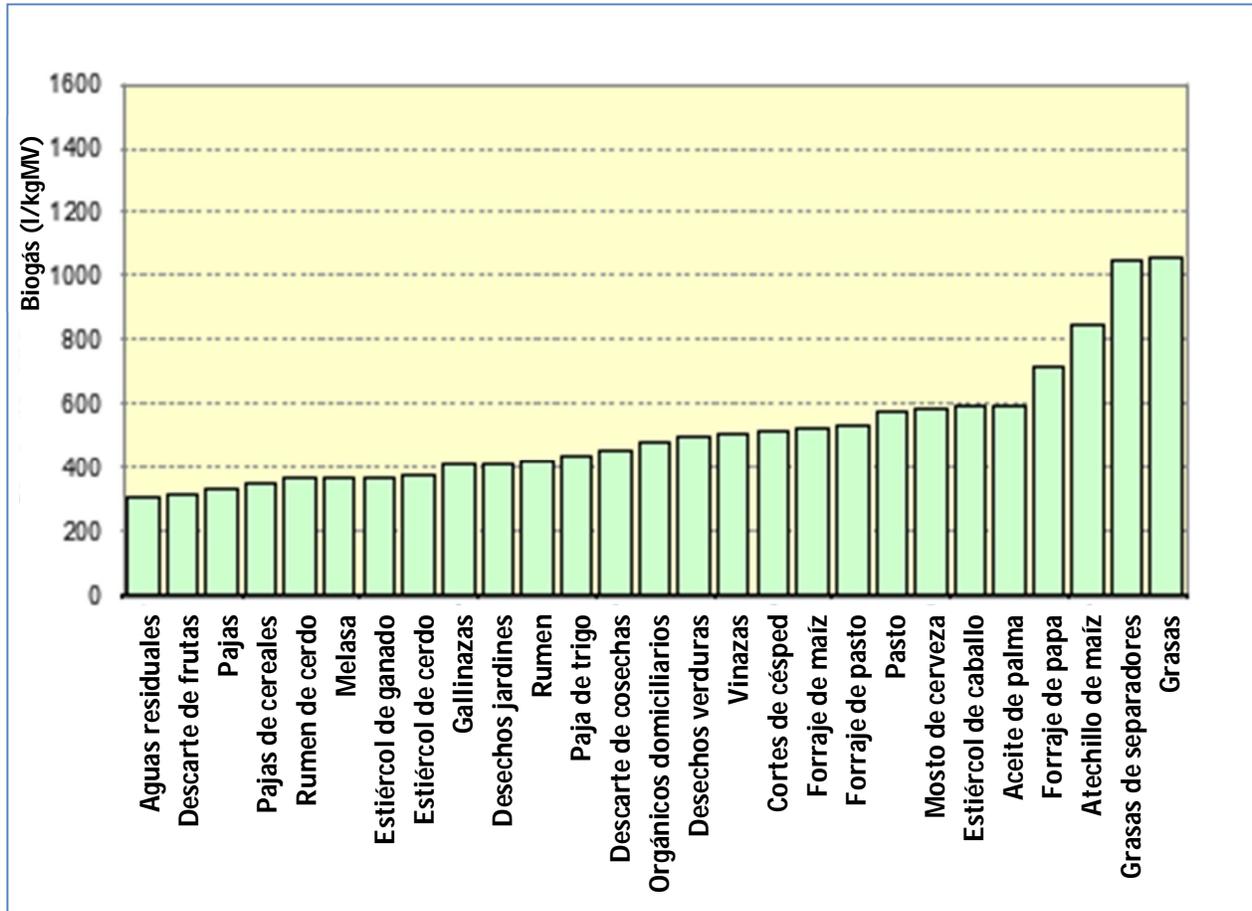


Figura 2.8 Producción de biogás de diferentes sustratos (Speece, 1983)

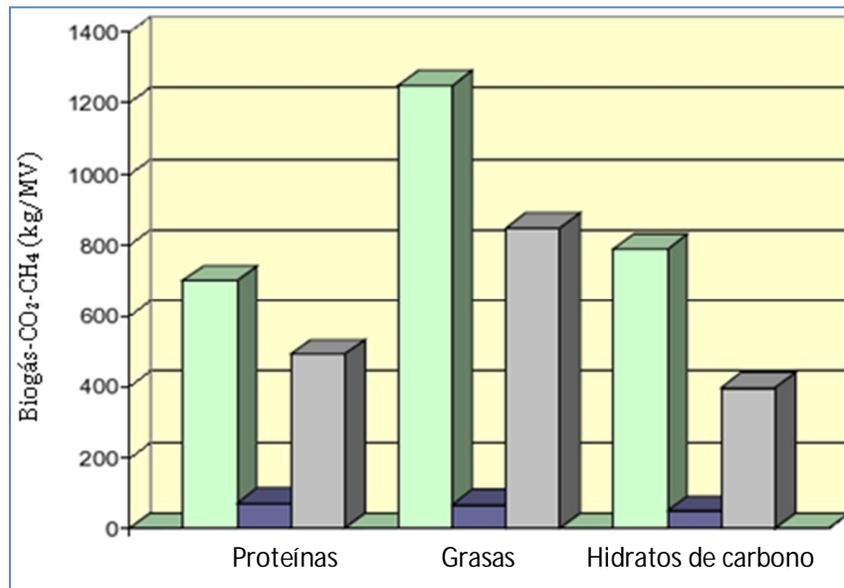


Figura 2.9 Producción de biogás en función de diferentes moléculas orgánicas (Speece, 1983)

Para calcular el caudal del biogás primeramente se deben analizar los gases que tienen una contribución significativa en términos de volumen total. Aparte del metano, que es el componente más abundante, habrá dióxido de carbono, agua y de nitrógeno. Adicionalmente, hay otros compuestos que son poco voluminosos pero cuya presencia tiene importancia a causa de su naturaleza: Oxígeno, amonio y principalmente, sulfuro de hidrógeno. Los gases nitrógeno, oxígeno y amonio están disueltos en el afluente, mientras el metano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno almacenados en el digestor. Por ser vapor y no gas, la presión parcial del H<sub>2</sub>O es constante para una determinada temperatura y no depende de la presión de la fase gaseosa.

Muchos reportes indican que las plantas de gran escala enfocadas al tratamiento de la fracción orgánica de los residuos domiciliarios, alcanzan producciones de 0.10-0.15 m<sup>3</sup>/kg húmedo (Tablas 2.4 y 2.5). El biogás producido puede contener entre 50-70% por volumen de metano, lo cual da muestra del enorme potencial de su aprovechamiento. La producción de metano es mucho más atractiva que la producción de biogás, sin embargo implica equipos muy precisos para la medición y el control de los gases (cromatógrafo de gases) los cuales son muy costosos. Además los residuos orgánicos urbanos puede variar enormemente en el contenido de la masa volátil debido a las proporciones de papel, pastos, madera y algunos otros materiales lignocelulósicos. Por esta razón, la literatura científica reporta las producciones en términos de unidades de masa seca o masa volátil. Ésto presupone que la biodegradabilidad está relacionada con la masa volátil, sin embargo los materiales lignocelulósicos tienden a ser menos degradables que otros. Una mejor aproximación es la demanda biológica de oxígeno de 5 días (BOD-5), pero el método estándar para medir el BOD-5 contenido en algún sustrato por lo que es menos común (Fricke y col., 2005).

La eficiencia de un digestor en términos de la producción de biogás por unidad de volumen del digestor puede calcularse multiplicando la carga orgánica volumétrica por la producción específica de biogás. Por lo tanto puede observarse que en digestores alimentados con residuos orgánicos separados desde las fuentes, operados a 55°C, se pueden alcanzar producciones de cerca de 0.8 m<sup>3</sup>/ kg MV, cuando la COV es de 2 kg de MV/m<sup>3</sup> de digestor/día y la producción de biogás 1.6 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>/día. Mientras que la producción asociada a las condiciones mesofílicas puede ser notablemente menor, de entre 0.45-0.3 m<sup>3</sup>/kg MV, pero la carga orgánica es mayor (entre 6 y 9 kg MS/m<sup>3</sup>/día) y la producción de biogás es de 2.7 m<sup>3</sup>/ m<sup>3</sup>/día, con un porcentaje de 70% metano. No está por demás decir que todos los digestores estudiados con producciones mayores de 3 m<sup>3</sup>/ m<sup>3</sup>/día fueron termofílicos (Hartmann y Ahring, 2006).

En las Tablas 2.4, 2.5 y 2.6 se indican los resultados de un análisis realizado para determinar la producción de biogás de varios sustratos en relación al TRH y la temperatura, así como la producción en términos específicos de masa volátil y masa seca.

En la práctica es casi imposible calcular empíricamente y con exactitud la producción de biogás de una biomasa o mezcla. Esto se debe a que se desconoce la cantidad exacta de nutrientes y componentes de la mezcla o biomasa. Las estimaciones se realizan con base en mediciones puntuales del contenido de nutrientes, pero estos pueden variar en la biomasa día a día. Adicionalmente la mayoría de los cálculos del potencial teórico de la producción de biogás en un digestor se hacen considerando una degradación del 100 % de la materia orgánica, lo que generalmente nunca sucede (Di Palma y col., 1999).

**Tabla 2.4 Producción de biogás de diferentes tipos de biomasa (CIWMB, 2008)**

<b>Sustrato</b>	<b>Rango de producción de biogás (l/kg MV)</b>	<b>Producción media de biogás (l/kg MV)</b>	<b>Contenido de metano (%)</b>
Algas	420-500	-----	63
Bagazo	140-190	160	-----
Bagazo	165	165	-----
Cañas, juncos	170	170	-----
Cáscaras de cacahuete	365	-----	-----
Cáscaras de arroz	105	105	-----
Cereales	180-320	250	-----
Césped	280-550	415	-----
Estiércol de cerdo	340-650	495	65-70
Estiércol de oveja	100-310	200	68
Estiércol de vaca	200-500	350	65
Gallinaza	350-500	425	60
Hojas caídas	210-290	-----	58
Paja de arroz	170-280	220	-----
Paja de avena	290-310	300	59
Paja de cebada	250-300	275	59
Paja de maíz	350-480	410	-----
Paja de trigo	200-300	250	50-60
Residuos de agricultura	310-430	360	60-70
Residuos vegetales	330-360	345	-----
Restos de azúcar de remolacha	400-500	450	-----
Restos de papas	280-490	385	-----
Semillas	620	620	-----

Muchos de los sistemas de tratamiento de la parte orgánica de los residuos sólidos urbanos en el mundo, utilizan la co-digestión de lodos municipales y residuos. Usualmente se inició por introducir residuos en digestores de plantas de depuración de agua residual como en la ciudad de Viareggio, donde se incrementó la carga orgánica en 20% logrando producciones de biogás 58% mayores (0.56 m<sup>3</sup>/kg MV). Este experimento se ha repetido en otras partes del mundo con buenos resultados, lo que abre la posibilidad de tratar residuos municipales en la infraestructura existente de digestión sin necesidad de realizar inversiones adicionales (Bolzonella y col., 2006).

**Tabla 2.5 Producción de biogás y metano de varios sustratos a un tiempo de retención de 20 días y una temperatura de 30°C (Juanga y col., 2007)**

Sustrato	Biogás (l/kg MV)	Metano (%)
Estiércol de cerdo	340-550	65-70
Estiércol de ganado	90-310	65
Gallinaza	310-620	60
Pajas de trigo	200-300	50-60
Pajas de arroz	200-300	59
Paja de cebada	250-300	59
Paja de avena	290-310	59
Paja de maíz	380-460	59
Lino	360	59
Hierba, césped	280-550	70
Pasto elefante	430-560	60
Carrizos	170	-----
Residuos de vegetales	330-360	-----
Papas	260-490	-----
Remolacha	400-500	-----
Desechos agrícolas	310-430	59
Semillas	620	60-70
Algas	420-500	-----
Lodos depuradoras	310-740	63

**Tabla2.6 Producción de biogás y gas metano de diferentes co-sustratos (De Baere, 1999)**

Sustrato	MS %	MV %	Producción de biogás m <sup>3</sup> /kg MV	Metano m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg MV	Metano %
Panes viejos	90%	97%	0.8	0.6	75%
Vinazas de manzana	3%	95%	0.53	0.33	62%
Mostos de cerveza	25%	66%	0.7	0.38	54%
Desechos domiciliarios, cocinas	18%	75%	0.4	0.24	60%
Grasas de separadores	50%	96%	1	0.7	70%
Lodos de depuradoras	18%	92%	1	0.7	70%
Desechos de verduras	15%	84%	0.6	0.4	67%
Cereales	88%	97%	0.65-0.72	0.38	53%
Forraje de pasto	38%	90%	0.45-0.61	0.35	55%
Desechos de jardines	26%	90%	0.40-0.65	0.42	55%
Descarte de papas	25%	79%	0.65	0.45	69%
Puré de papas	22%	90%	0.73	0.43	59%
Rumen de cerdo	13%	82%	0.5	0.3	60%
Maíz en grano	88%	98%	0.75-0.80	0.43	53%
Forraje de Maíz	33%	96%	0.60-0.70	0.4	53%
Melaza	77%	90%	0.72	0.39	54%
Mostos de frutas	18%	93%	0.6	0.38	63%
Tortas de extracción, aceite	91%	94%	0.72	0.45	62%
Forraje de pasto sudan	35%	93%	0.7	0.4	57%

Los volúmenes de biogás producidos se expresan en m<sup>3</sup>/kg de masa volátil m<sup>3</sup>/kg.MV, como m<sup>3</sup>/kg.DQO o en litros por kilogramo de masa seca (l/kg MS) o metros cúbicos por tonelada de masa húmeda (m<sup>3</sup>/ton MV). Estos volúmenes difieren según el tipo de residuo, la concentración de sólidos volátiles, la relación carga/volumen del digestor, el tiempo de retención de los residuos dentro del digestor y el diseño del mismo. En general la producción promedio oscila entre 1 y 2 m<sup>3</sup> biogás/m<sup>3</sup> digestor, o dicho de otra manera entre 0.3 y 0.8 m<sup>3</sup>/kg.MV o alrededor de 0.35 m<sup>3</sup> de gas metano por kg DQO degradado. Hay sustratos como el pasto o forraje de maíz que producen mayores cantidades de biogás por kg.MV (De Baere, 1999).

Adicionalmente existen otros factores con mucha influencia en la producción de biogás, como el tiempo de retención, la temperatura, el porcentaje de masa seca, masa volátil y la cantidad eventual de inhibidores de la producción de biogás contenidos en la biomasa.

**Tabla 2.7 Producción de biogás de varios tipos de biomasa (Di Palma y col., 1999)**

Sustrato	m <sup>3</sup> biogás/kg MV
Orujos agrícolas, pe. Cerveceros, fabricantes de zumo	0.42 a 0.50
Residuos de matadero y de la transformación de pescado	0.34 a 0.71
Residuos "verdes" de jardinería y agrícola	0.35 a 0.46
Residuos alimenticios y piensos	0.32 a 0.80
Orujos de la destilación de patata y cereales aprox.	0.48
Residuos orgánicos domésticos	0.40 a 0.58
Residuos de separadores de grasa (gastronomía)	0.70 a 1.30
Purinas agrícolas	0.22 a 0.55
Fango de procesos de depuración	0.45 a 0.55

Por un lado, la velocidad de degradación de la materia orgánica se consigue también aumentando la temperatura al interior del digestor. Pero solo se consigue hasta un cierto límite, ya que no es posible aumentar la temperatura a valores muy elevados, debido a que las bacterias dejarían de producir biogás. Pero por otro lado hay que tener en cuenta, que con el aumento de la temperatura, se consigue una mayor producción de CO<sub>2</sub> y por lo tanto una menor producción de gas metano. Ésto ocasiona que el biogás que se produzca tenga un bajo poder calorífico (CIWMB, 2008).

La producción de biogás la determina el contenido de proteínas, hidratos de carbono y gases que forman la biomasa o los sustratos que se co-digestionan. La mayor cantidad de biogás se obtiene de las grasas, pero el mayor % de gas metano se obtiene de las proteínas (71%) (Converti y col., 1995). La menor producción de metano se obtiene de los hidratos de carbono. Por estas razones es muy importante lograr una mezcla de sustratos equilibrada en donde se produzca la mayor cantidad de biogás, pero también el mayor

contenido porcentual de gas metano. Las concentraciones pueden ser expresadas en cualquier unidad (g/l, mol/l, etc.). La Tabla 2.8 exhibe los valores de coeficientes de distribución para diferentes gases y temperaturas.

**Tabla 2.8 Coeficiente de distribución de varios componentes del biogás  
(Converti y col., 1995)**

Gas	Fórmula	Peso molecular (g/mol)	Temperatura (°C)		
			20	25	30
Metano	CH <sub>4</sub>	16	0.034	0.032	0.31
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	44	0.94	0.83	0.74
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	28	0.017	0.016	0.015
Oxígeno	O <sub>2</sub>	32	0.034	0.032	0.030
Amonio	NH <sub>3</sub>	17	0.76	0.71	0.67
Gas sulfuro	H <sub>2</sub> S	34	2.87	2.55	2.27

## 2.5 Pre-tratamientos para la digestión de residuos sólidos urbanos

A continuación se describe el dimensionamiento de los principales equipos, procesos:

### 2.5.1 Selección y separación previa

Cuando se tratan residuos sólidos municipales, para asegurar que no ingresarán impurezas o materiales peligrosos al sistema de digestión, se debe prever la instalación de un módulo de pre selección de materiales que puede constar de tecnologías muy simples o muy avanzadas dependiendo de los alcances. Aquí se enlistan las más recurrentes:

1. Selección manual (Figura 2.10). Es el método más primitivo para la separación de materiales. Los seleccionadores tienen dos funciones: Recuperar los materiales de valor que no necesitan ser procesados en la línea, a lo que se conoce como *selección positiva* y por otro lado la función puede ser remover los materiales que pueden causar un peligro para etapas secundarias de procesamiento como explosivos a lo que se conoce como selección negativa. La experiencia ha mostrado que una persona tiene la capacidad para seleccionar hasta 1000 lb/hora (SMMAALC, 2000).

Una banda de selección no debe ser más ancha de 24 pulgadas (60 cm) para un sistema donde los seleccionadores estén en un solo lado de la misma, pero debe estar entre 90 y 120 cm cuando hay seleccionadores en ambos lados. No debe moverse más rápido de 30-40 ft/min (alrededor de 9 m/min).



**Figura 2.10 Personal en una planta de selección manual (SMMAALC, 2000)**

Para calcular un sistema de selección manual basta con establecer la carga diaria de material en masa y volumen pues hay módulos completos de selección disponibles en el mercado y están diseñados en función del volumen a tratar.

Los sistemas manuales suelen ser elevados algunos metros, los necesarios para que en la planta baja se realicen las maniobras con los sacos de material y los procesos de acondicionamiento de los materiales, a través de montacargas.

Regularmente se necesita un mínimo de 8 personas, que seleccionan los residuos comercializables y los dejan caer a través de ductos hacia los almacenamientos, que en México

La densidad aproximada medida en los residuos con un contenido de 80% orgánicos es de  $\delta = 0.8 \text{ ton/m}^3$  (Hickman, 1976).

$$\text{Volúmen diario} = \frac{\text{Masa diaria}}{\delta} \quad (2-1)$$

2. Cribas. Sin duda, los trommels (Figura 2.11) son los sistemas de separación por cribas más populares. Son cilindros inclinados montados en ejes rodantes, con agujeros en los lados. Estos tambores giran a baja velocidad (10-15 rpm), por lo que utilizan motores de muy baja potencia. La principal ventaja de estos sistemas es su resistencia a los atascos, debido a la rotación y la inclinación que producen un fenómeno de cascadeo que obliga a los materiales a despegarse de las paredes por la turbulencia. Algunos equipos cuentan con espinas capaces de abrir las bolsas de los residuos por lo que suelen usarse al inicio de un módulo de recuperación de materiales (López y col., 1980).

Otros ejemplos de cribas son las mallas vibratorias y los discos malla, cuyo principio de funcionamiento se basa en separar los materiales por su tamaño. Los materiales cuyo tamaño sea menor que las aperturas pasarán por ellas y se separarán de los materiales más grandes. Regularmente se usan para separar la materia orgánica después de un proceso general de trituración.



**Figura 2.11 Ejemplo de un trommel de dos etapas  
(López y col., 1980)**

3. Separadores por densidad. El principio de funcionamiento de estos equipos se basa en la dinámica del movimiento de una partícula en un fluido, descrito en buena medida por la Ley de Stokes, ya sea líquido o gaseoso. Este movimiento está determinado de manera general, por tres fuerzas:
  - i. Gravedad o fuerza centrífuga
  - ii. Fuerza de flotación
  - iii. Fuerza de arrastre

Al final, los factores más importantes son el tamaño de partícula y la densidad del material y, debido a que los residuos sólidos urbanos son tan heterogéneos, estos equipos se utilizan después de la molienda.

Los equipos más comunes son las plantillas de sedimentación en agua y los clasificadores de aire en diferentes configuraciones: Ciclón, zigzag, con cama de vibración y lanzamiento horizontal (Cheremisinoff, 2003).

Los equipos más efectivos para separar partículas de diferente densidad son los jigs o plantillas de sedimentación acuosa. Estos equipos solían usarse originalmente en las minas de oro para separar las pepitas del metal precioso de las partículas de tierra y otros minerales.

El material es sumergido en agua dentro del sedimentador y está sujeto a fuerzas pulsantes producidas por un émbolo o diafragma, a través de las que el material se eleva y luego desciende alternadamente, por lo que las partículas nunca alcanzan su velocidad terminal y la separación se da únicamente por densidad.

Algunos equipos cuentan con mallas para que las partículas que ya fueron separadas por su alta densidad sean retenidas y se sedimenten por completo, impidiendo volver a contaminar la fracción ligera y mediana, como los residuos orgánicos.

Los equipos de clasificación húmeda por corriente ascendente utilizan el mismo principio que los clasificadores de aire, con la diferencia que el fluido utilizado es

regularmente agua, con una gravedad específica aproximada de 1.0. Los materiales que tienen una velocidad de sedimentación menor que la corriente son arrastrados a la superficie y removidos, mientras que los que la superan, se sedimentan. La determinación de que una partícula dada flote o se sedimente no depende únicamente de su densidad, sino también de su forma y tamaño, así como la viscosidad del medio. Estos equipos son diseñados para que la velocidad de la corriente sea ajustada con objeto de alcanzar las mayores eficiencias de remoción en operación (Wang y Pereira, 1980).

## 2.5.2 Trituración

En esencia, la trituración o molienda es un método para reducir el tamaño de partícula de los residuos. Para la trituración se necesita considerar los siguientes parámetros:

- i. Tamaño de partícula
- ii. Demanda ( $m^3/h$ )
- iii. Alimentación y salida
- iv. Potencia

Seleccionar una trituradora adecuada no es tan simple pues depende en gran medida de las propiedades físicas del material a procesar, sin embargo, se han tomado equipos para aplicaciones específicas en la industria química o minera y se han realizado aplicaciones en esta materia. Los equipos más importantes son el molino de martillo, que puede ser vertical u horizontal, los cortadores, las trituradoras de cuchillas de baja velocidad y los molinos de malla (Monroy y col., 1998).

## 2.5.3 Procesos de pre-tratamiento combinados

Una de las tecnologías más avanzadas a nivel mundial es el proceso BTA® desarrollado por la empresa danesa BTA International GmbH. Esta empresa utiliza un proceso húmedo de aproximadamente 8-12% de sólidos totales, un rango mesofílico de 35-38°C y un sistema de pre-tratamiento hidromecánico (Figura 2.12) que consta de un módulo de separación en tres fases y un removedor de arenas.

Para la primera fase se usa un equipo llamado despulpadora, que fue desarrollado por la industria del papel y utiliza fuerzas hidro-dinámicas para separar la fracción orgánica y convertirla en una suave pulpa. Los tres objetivos de este proceso son:

- A. Desintegración de la materia orgánica para mejorar su posterior degradación
- B. Remoción de la fracción pesada compuesta por contaminantes no biodegradables como piedras, vidrio, huesos, pilas y otros metálicos.
- C. Remoción de la fracción ligera compuesta por textiles, madera, bolsas, etc.

La pulpa orgánica es llevada a un contenedor después del despulpador para ser alimentada con el agua necesaria para alcanzar el contenido de humedad fijado y nuevo material es alimentado al despulpador por una banda; y cuando el material es suficiente, la banda se detiene automáticamente. Durante la carga, el despulpador trabaja a baja velocidad.

El impulsor del despulpador está diseñado para que la cuchilla hidráulica infrinja daño sólo a los materiales orgánicos y no a la fracción pesada, por lo que la potencia se controla rigurosamente para generar este fin con la mínima energía posible.

Al principio, las partículas pesadas llegan al fondo del tanque y son afectadas por el movimiento centrífugo por lo que se almacenan en las orillas donde son refugiadas por cámaras periféricas. En una segunda fase, se incrementa la velocidad de las cuchillas para reducir más el tamaño de partícula de los materiales orgánicos, ya que se ha minimizado el riesgo de daño a los materiales pesados. Después, la pulpa con un contenido de 12% de humedad deja el tanque a través de un disco en el fondo con perforaciones de 10mm, que sirve de criba para materiales ligeros no degradables.

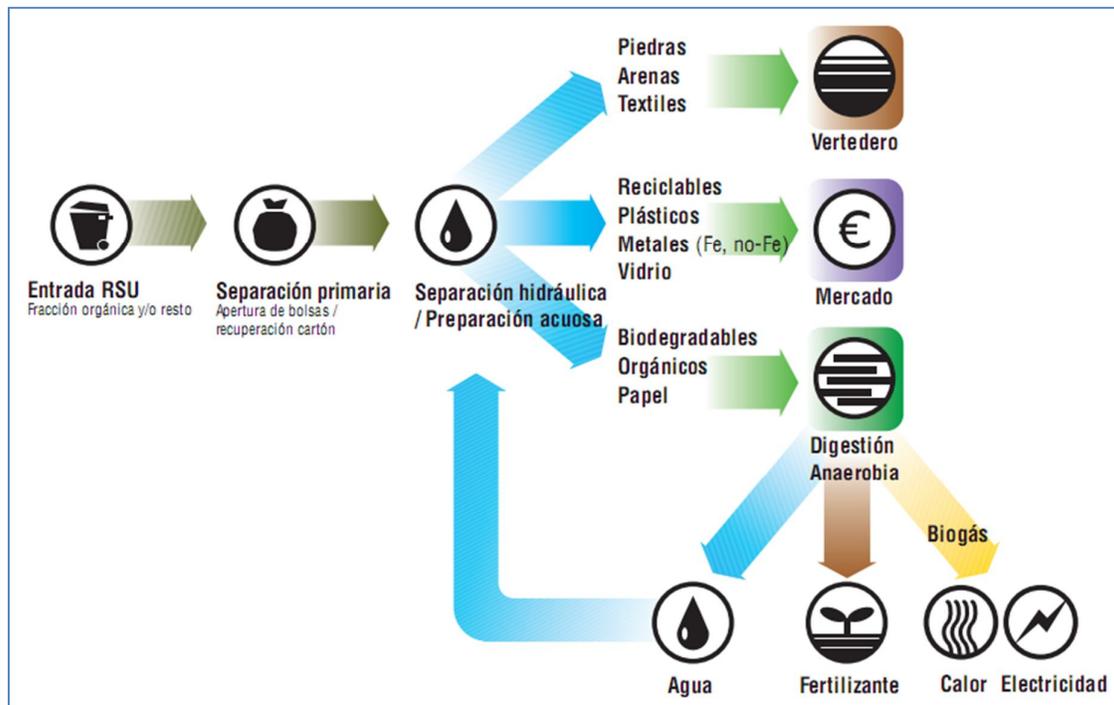
Después de la descarga del despulpador se introduce el agua de proceso para hacer que los materiales ligeros floten y posteriormente se utiliza una serie de paletas con malla que recogen estos materiales y los descargan por un extremo del tanque.

La remoción de arenas se realiza por lote y consiste simplemente en dejar que las pequeñas partículas se sedimenten. Para acelerar este proceso se utiliza una especie de hidro ciclón y para mejorar la remoción se puede recircular la pulpa varias veces (Ramalho, 1996).



**Figura 2.12 Sistema BTA® de pre-tratamiento hidromecánico (Haines, 2005)**

Otra empresa trasnacional que utiliza un pre-tratamiento con principios similares es ArrowBio® (Figura 2.13). Primero hacen pasar los residuos por un trommel con espigas de donde se obtiene una parte de los materiales orgánicos que pasan directo al tanque de separación hidráulica. La parte más heterogénea que sale del trommel pasa primero por una banda de selección manual, donde se retiran los materiales con un precio de mercado importante y los voluminosos. Al final las dos fracciones orgánicas sucias se limpian en un estanque con flujo forzado de agua, que de hecho se recircula constantemente, para decantar los materiales más pesados de los ligeros. Los residuos orgánicos por tener una densidad muy similar a la del agua se mantienen a una profundidad media dentro del canal y son canalizados hacia el despulpador, que termina de purificarlos (Finstein y Zadik, 2009).



**Figura 2.13 Diagrama de proceso de tratamiento de ArrowBio®**  
(Finstein y Zadik, 2009)

## 2.6 Uso de lodos digeridos

Como se ha dicho anteriormente, el tratamiento anaerobio consiste en una serie de procesos que se dan espontáneamente en la naturaleza y que tienen como finalidad fraccionar las macromoléculas que componen la materia orgánica en moléculas más simples y aprovechables por la naturaleza, en diferentes formas. Ya se ha hablado de la importancia de la metanogénesis para volver atractivo el sistema utilizando el poder calorífico del biogás. Sin embargo, el aprovechamiento de los nutrientes contenidos en la materia orgánica es indispensable en el desarrollo de este proyecto, pero para hacerlo económicamente es necesario aplicar una serie de adecuaciones dentro de la mezcla efluente de los reactores anaerobios. La idea es llevar el sustrato de la humedad que posee en la salida del reactor, hasta una humedad cercana al 35%, que le brindaría la consistencia adecuada para ser aplicado en sembradíos sin el problema de la lixiviación, y para reducir los costos de transportación de producto terminado.

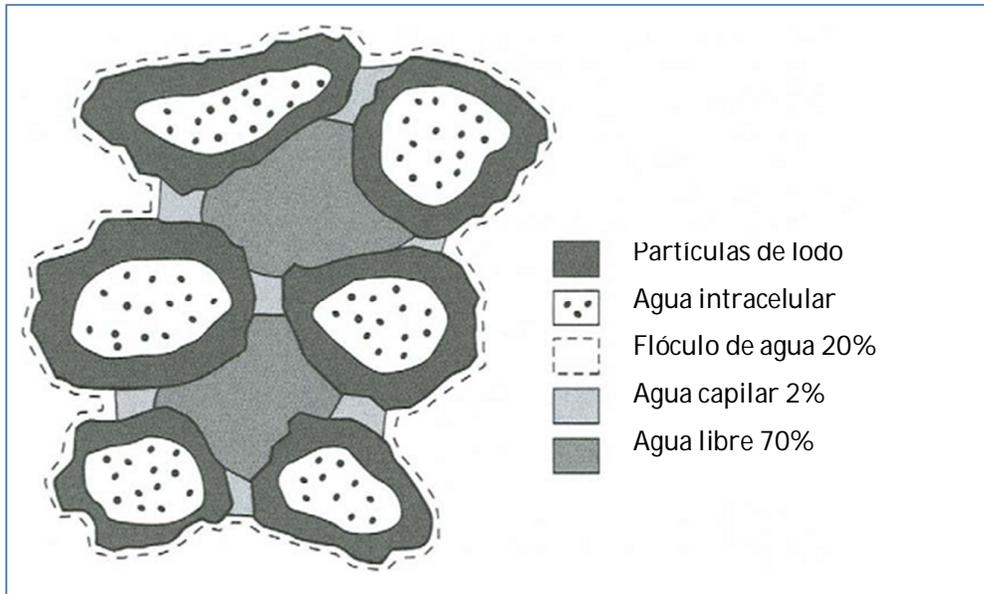
Los lodos están constituidos por partículas muy heterogéneas, tanto en su tamaño como en su constitución. Los lodos resultantes del tratamiento anaerobio contienen materia gelatinosa, materia coloidal y partículas de todas formas y dimensiones.

El agua contenida en los lodos se manifiesta en dos formas como se puede observar en la Figura 2.14:

- Agua intersticial, como la capilar, el agua libre y la que está floculada.
- Agua de impregnación o intracelular, en el interior de las partículas, como por ejemplo la que contendría una gelatina.

La mayor parte del agua intersticial puede ser fácilmente removida (70%), pues no está muy ligada al material, con procesos como espesamiento, evaporación, extrusión, succión o inercia. Sin embargo, existe un remanente muy difícil de obtener, debido a que está adherido a las partículas por fuerzas de capilaridad y por lo tanto sujeto a tensiones superficiales que pueden ser más débiles o más fuertes en función de la composición química del agua intersticial (Lothar, 1985).

Existen sustancias químicas capaces de alterar la tensión superficial y así liberar al agua, aunque con algunos procesos físicos también se logra aproximar las partículas, expulsando el agua capilar. La dificultad de usar solamente procesos físicos es que existen algunas partículas intersticiales que actúan como tapones y dificultan el drenaje del agua.



**Figura 2.14 Agua contenida en los lodos digeridos (Gray, 2005)**

La mayoría de las sustancias acondicionadoras son empleadas para agrupar las partículas en flóculos mayores que se comportan un tanto diferentes y esto desaparece el efecto tapón de las partículas intersticiales.

Para el agua de impregnación, que puede llegar a ser un 40% del total, se utilizan métodos térmicos de remoción. Sin embargo, a veces no es práctico tratar de obtenerla pues puede romperse la estructura de las partículas dificultando la salida del agua intersticial y obstruyendo los poros de los materiales filtrantes (Lothar, 1985).

Como se observa en la Figura 2.15, el contenido de humedad de los lodos después de la deshidratación, llevado a cabo con procesos térmicos principalmente, puede variar significativamente (60 a 20%). Por otro lado, el volumen que ocuparía esta mezcla tan sólo varía de 12.5 a 5% fluctuando por diversos factores, entre ellos, la proporcionalidad agua intersticial- agua intracelular y la tensión superficial de la misma.

Las operaciones que se utilizarán para secar el lodo digerido, son las que se siguen comúnmente para el acondicionamiento de lodos biológicos en la industria del tratamiento de aguas y lodos residuales, pues permiten la separación y recuperación del agua para posteriormente utilizarla en procesos y servicios de la planta. En la Figura 2.16

se puede observar el proceso generalizado de una estación de depuración de aguas residuales (EDAR).

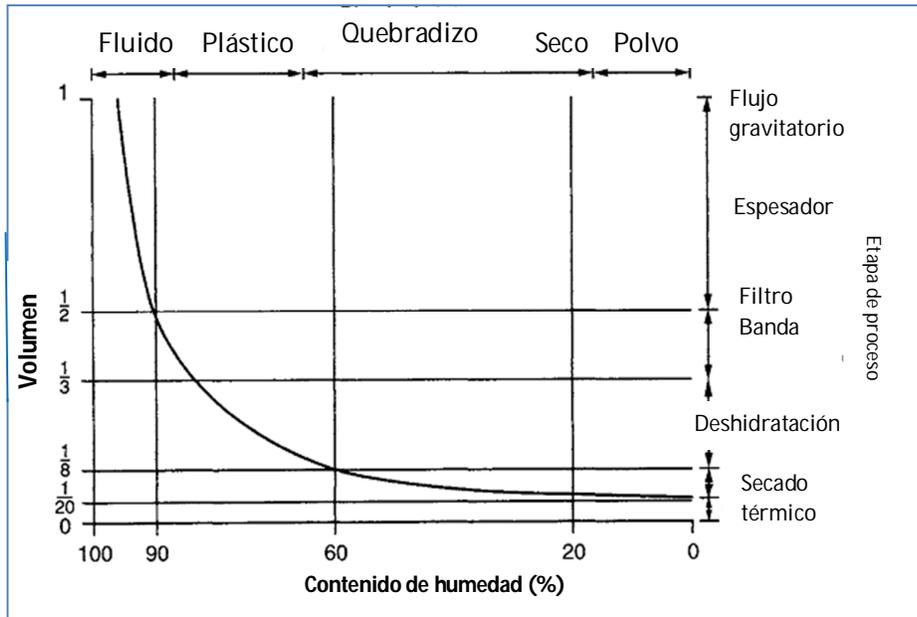


Figura 2.15 Volumen de lodos digeridos versus contenido de humedad (Gray, 2005)

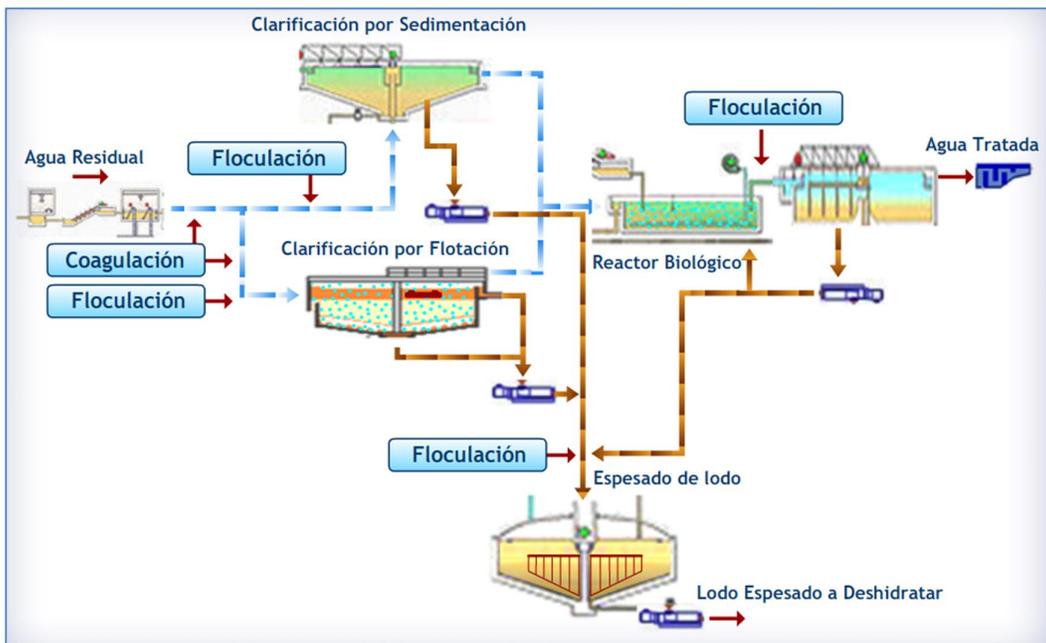


Figura 2.16 Proceso general en una estación de depuración de aguas residuales (CQ, 2009)

En general, el proceso aplicado al tratamiento de lodos en una estación de depuración de aguas residuales parte de un espesamiento primario, llevado a cabo en tanques, por gravedad o flotación con aire disuelto.

Pueden considerarse tres tipos de mecanismos o procesos de sedimentación por gravedad, dependiendo de la naturaleza de los lodos presentes:

- 1) Sedimentación discreta
- 2) Sedimentación con floculación
- 3) Sedimentación por zonas

En la sedimentación discreta, las partículas mantienen su individualidad es decir, no se someten a un proceso de coalescencia. En este caso, las propiedades físicas como tamaño, forma y peso específico no cambian durante el proceso. Un ejemplo típico sería la deposición de partículas de arena en un desarenador (Ramalho, 1996).

Se puede modificar la densidad de las partículas y su velocidad de sedimentación cuando se logra que se aglomeren pues se forman partículas de diferentes tamaños lo que crea nuevas relaciones entre ellas y el fluido. Este tipo de sedimentación es el que se sigue en los clarificadores o espesadores primarios.

El tercer tipo de sedimentación se consigue al formar flóculos muy grandes que pueden llegar a ser zonales, ésto cambia totalmente la cinética de la precipitación de las partículas pues no es posible modelarlos como medios discretos. Ejemplo de ello es lo que se lleva a cabo en los espesadores o sedimentadores secundarios de lodos activados o en la separación de flóculos de alúmina (Gray, 2005).

En las EDAR, después de la sedimentación primaria o clarificación, los lodos son llevados a un proceso de degradación biológica, donde se pretende que los elementos presentes en los compuestos orgánicos sean regresados a sus formas minerales, rompiendo las cadenas poliméricas y liberando el agua enlazada. Por otro lado, se busca eliminar la presencia de organismos patógenos, pues es un factor limitante del posible aprovechamiento de los residuos de las plantas. Es por estas razones que la tecnología aplicada en una EDAR común sea totalmente compatible con los objetivos del tratamiento de la parte orgánica contenida en los RSU (CEPIS, 2005a).

Para extrapolar la tecnología a nuestros proyectos tan sólo es necesario revisar las siguientes etapas de acondicionamiento de lodos, es decir, el espesamiento secundario, la remoción mecánica de humedad, el secado por aireación y el tratamiento térmico.

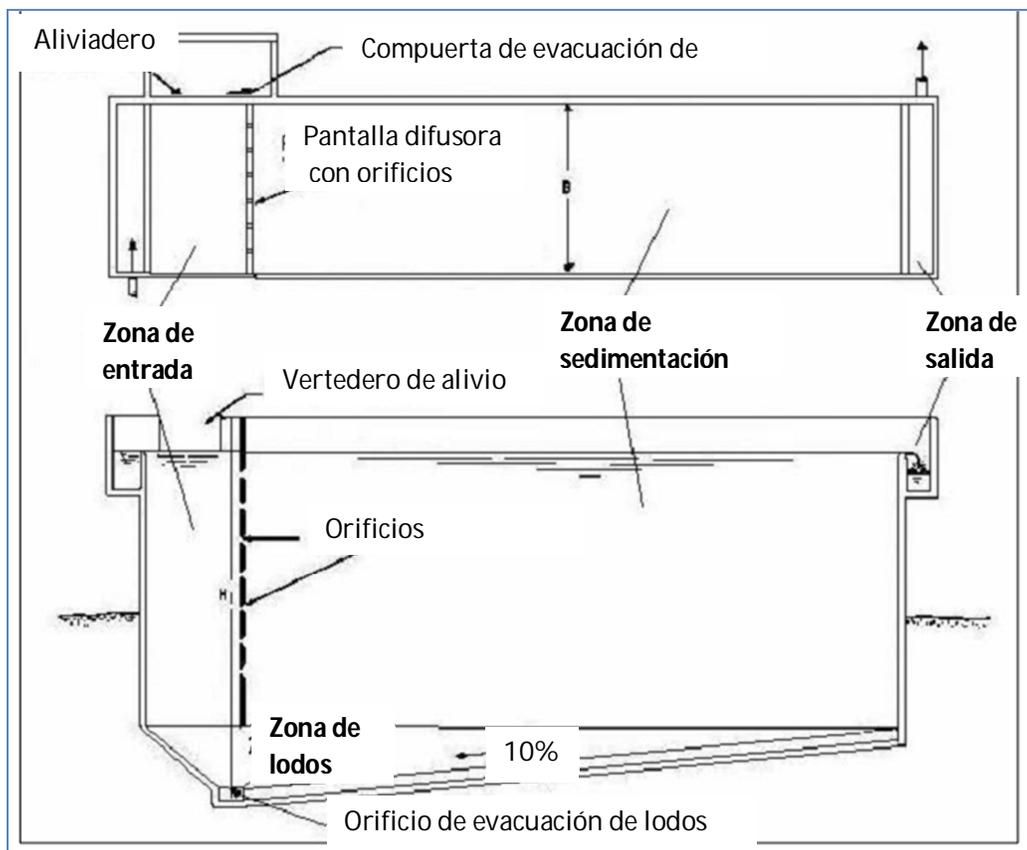
A continuación se definirán los procesos necesarios para reducir la cantidad de agua en los lodos y llegar hasta la humedad deseada de 35% (fijada en ese valor debido a las características de los abonos en el mercado):

- I. Espesador secundario (Figura 2.17). Son sistemas que pueden tener formas cilíndricas o prismáticas con armazones de hormigón o metálicos. El equipo constará de 4 zonas:
  - Zona de entrada. Su función es uniformizar el flujo para tratar de conseguir un perfil de velocidades muy cercano a una distribución laminar.
  - Zona de sedimentación. Es un canal con las condiciones adecuadas para sedimentar las partículas en el tiempo de retención.
  - Zona de salida. Se compone de vertedero o canaleta para el desalojo del efluente líquido sin afectar la sedimentación de las partículas.

- Zona de recolección de lodos. Prácticamente es una tolva con capacidad para depositar los lodos sedimentados y un sistema de desalojo periódico.

Algunos de los componentes que deben ser considerados se describen a continuación:

- Grupo motriz. Formado por un sistema moto-reductor.
- Eje. Transmite todo el esfuerzo al conjunto.
- Barredores de fondo. Montados sobre brazos soportes diametralmente opuestos.
- Piquetas de espesamiento. Tienen como función acelerar la sedimentación de partículas al aplicar una fuerza sobre las partículas flotantes con el mismo sentido que la gravitatoria.
- Campana central. Tiene por objetivo desarrollar la zona de entrada para controlar el flujo como si fuera laminar.



**Figura 2.17 Zonas en un sedimentador (CEPIS, 2005b)**

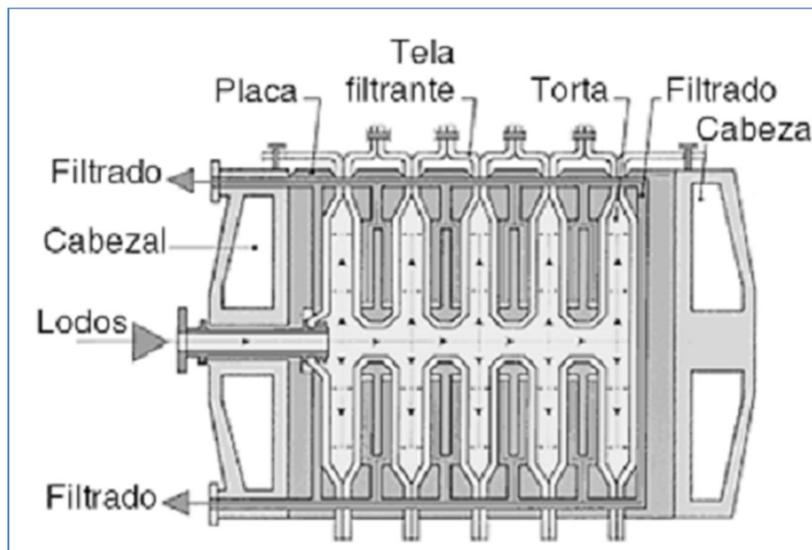
- II. Deshidratación mecánica. Como ya se revisó antes existen varias tecnologías para acelerar el proceso de separación de sólidos y líquidos. Estos dispositivos utilizan como principio el aumento de presión o gravedad entre las fases.

Los sistemas más utilizados son los filtros de vacío, los filtros prensa, los filtros banda y los centrifugadores.

Para este estudio se contemplarán con más precisión los filtros prensa y banda, por ser los dispositivos más accesibles en la industria nacional.

*Filtro Prensa.*- Como se observa en la Figura 2.18 consisten en una serie de placas que se soportan sobre una estructura de tipo bastidor. Las placas, cuyas superficies son ranuradas, están recubiertas por una tela filtrante. Cuando se juntan y presionan las placas se forma una cavidad entre ellas que será progresivamente ocupada por el lodo.

Se utilizan presiones elevadas de 40 a 150 N/cm<sup>2</sup> durante periodos de hasta tres horas. La capacidad de filtración oscila entre 5 a 15 kg/m<sup>2</sup>h, logrando tortas de 2 a 3 cm de espesor. Se obtienen tortas de 40 a 60% de concentración de sólidos y una separación prácticamente completa del material en suspensión.



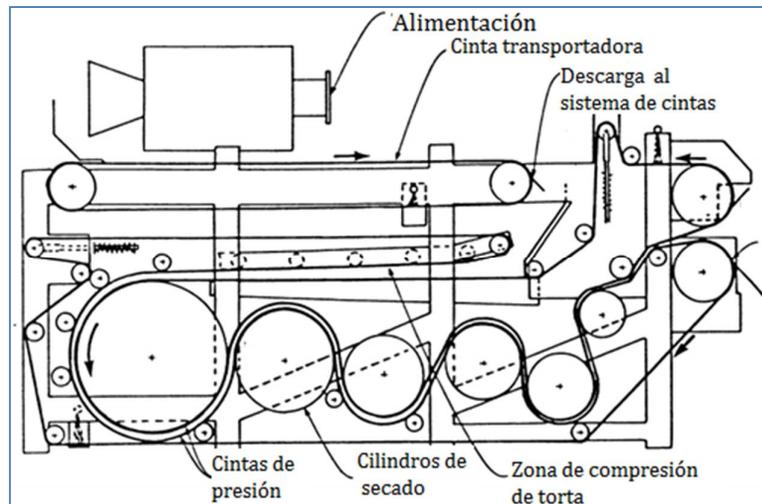
**Figura 2.18 Esquema de filtro prensa  
(Ramalho, 1996)**

Finalmente las placas se separan y la torta cae por gravedad, luego se lavan los filtros, se inspeccionan y se vuelve a repetir el filtrado. El ciclo completo puede durar hasta 5 horas. El lodo puede requerir acondicionamiento químico previo o se puede utilizar una capa de revestimiento como ayuda filtrante.

Las ventajas que puede tener un sistema de este tipo son la alta eficiencia de la separación, el alto contenido de sólidos en la torta, la gran variedad de tamaño en la placa (hasta de 2 x 2 m) y la posibilidad de usar hasta 150 placas o más. Como desventajas se tienen costos de inversión mayores que para las centrifugas y los filtros banda, el mantenimiento y la mano de obra requerida.

*Filtros banda.*- Una muy interesante alternativa a los filtros prensa, son los sistemas continuos de aplicación de presión, llamados filtros banda (Figura 2.19), los cuales tienen un principio de funcionamiento muy similar pero aplicaciones más específicas. Hoy en día, estos sistemas utilizan una combinación de procesos de secado: Drenaje por gravedad o percolación optimizados con sustancias coagulantes o floculantes (polielectrolitos) orgánicos o químicos y la deshidratación mecánica producto del aumento de presión entre los rodillos a los que se ajusta la banda filtrante.

Dentro de la primera etapa del sistema, apoyada en los agentes floculantes, alrededor de la mitad del agua es eliminada con tiempos de retención adecuados. Una vez concentrados los sólidos, se transfieren hacia la etapa de presión a través de la banda para ser exprimidos por los rodillos de diferentes diámetros.



**Figura 2.19 Esquema de un filtro banda convencional (Ramalho, 1996)**

La idea es aumentar la presión aplicada en la torta de manera progresiva por la disminución de los diámetros de los cilindros y el aumento en la tensión de la banda. La presión puede aumentar hasta  $7 \text{ kg/cm}^2$  y el tiempo puede ser ajustado hasta 20 min.

Los lodos producto de la digestión anaerobia no son fáciles de deshidratar mediante este sistema, si no es aplicado algún agente coagulante; sin embargo, se pueden obtener concentraciones de sólidos de hasta 95% con los sistemas más modernos.

*Tamizado y empaçado.*- Los últimos equipos que se necesitan para la utilización de los lodos deshidratados como un abono mejorador de suelos son una criba y un sistema de envasado. La función de la criba es homogeneizar el tamaño de partícula que finalmente será envasada, evitando que los gránulos más grandes sean empaçados. Algunos equipos cuentan con la capacidad de romper los gránulos para que las partículas resultantes puedan envasarse minimizando el desperdicio, lo cual es muy deseable.

Existen diferentes equipos para envasar el fertilizante que pueden ser totalmente manuales, electrónicos o una combinación de ambos. Estos equipos se constituyen de una tolva que ayuda a controlar y uniformizar el flujo de material que llega después del cribado y poseen una válvula de cierre rápido en el otro extremo para detener el flujo después de haber alcanzado la capacidad nominal y el contenido deseado en los sacos. La diferencia radica en la precisión deseada y los programas de calidad que se implementen en planta.

## **2.7 Purificación de biogás para su uso como combustible vehicular**

Se han realizado grandes desarrollos en los vehículos con la finalidad de disminuir la cantidad de emisiones contaminantes y aumentar la potencia y el rendimiento de los mismos, acorde a las nuevas tendencias de transporte sostenible, algunos ejemplos concretos se enlistan a continuación:

1. Motor de alta velocidad con variaciones en la elevación y tiempo de válvula (VETV). Permite reducir el tamaño del motor y alcanzar el máximo de potencia deseado al variar el tiempo de elevación y cierre de válvulas.
2. Desactivación de pistones en ralentí y carga parcial. Esta tecnología se usa sólo en motores que usan hidrocarburos convencionales. Se basa en la desactivación de las válvulas de admisión de algunos cilindros a bajas cargas, provocando que los otros cilindros operen a cargas más altas lo que eleva la eficiencia global del motor.
3. Transmisión variable continua (TVC). Brinda flexibilidad para satisfacer una cierta demanda poniendo a trabajar el motor a las revoluciones exactas. Conceptualmente, el TVC podría maximizar la economía del combustible a cargas parciales y proveer de desempeño máximo de aceleración cuando se requiriera. Adicionalmente contribuiría a que motores pequeños alcancen el mismo desempeño que generaría una transmisión convencional en motores grandes. La ventaja es la economía de combustibles., sin embargo, provoca una alta fricción interna.
4. Motor de inyección directa de gasolina (IDG). Los motores convencionales usan una inyección de punto múltiple (IPM), donde el combustible es inyectado sólo al llegar a ciertos puntos. En un motor IDG, el combustible es inyectado directamente en el cilindro como en un motor diésel y los tiempos de inyección son controlados de la forma más precisa para brindar las condiciones de carga exactas en el momento exacto lo que genera un control extremadamente preciso del combustible, alcanzando una mejor eficiencia que los motores diésel por permitir la combustión de una mezcla ultra ligera, una admisión muy eficiente y una relación de compresión relativamente alta la cual entrega a la vez rendimiento y potencia.
5. Motor de carga estratificada e inyección directa (CEID). Incorpora la VETV y la desactivación de cilindros en un ligero motor IDG y es precisamente el siguiente paso para los motores IDG. La estratificación de la carga en la cámara de combustión permite el uso de un amplio rango de combustibles y por la combustión más completa a cargas bajas a través de exceso de aire, permite alcanzar rendimientos más elevados y menores emisiones. El principal problema del sistema CEID es que genera altas emisiones de NO<sub>x</sub> por lo que requiere un catalizador.
6. Sistemas híbridos. Consisten de dos unidades de almacenamiento de energía, una batería y un tanque de combustible y un mínimo de dos transformadores: Un motor eléctrico y uno de gasolina. La combinación de estos motores ofrece un gran número de sistemas diferentes, pero puede ser agrupada en éstas tres categorías:
  - a. Híbrido en serie. Donde un generador transforma la energía mecánica de la combustión interna en electricidad. Aquí no hay conexión directa entre el motor de combustión interna y el eje motriz.
  - b. Híbrido combinado. La energía entregada por el motor de combustión interna puede ser transformada en energía eléctrica por el transformador y brindar movimiento mecánico al eje motriz.
  - c. Híbrido en paralelo. En este sistema ambos motores están conectados al eje motriz y es posible operar el automóvil con los dos al mismo tiempo o con cualquiera de ellos.

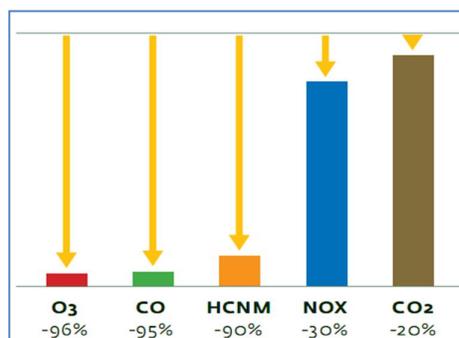
Los trenes de propulsión híbrida pueden ser construidos a bajo costo debido a que sus componentes son estándares. Esto significa que estos vehículos serán comercializados de forma masiva en poco tiempo. Las principales ventajas de estos sistemas son la capacidad para no perder aceleración sin interrupción de torque durante los cambios y la reducción de entre 15-25% del consumo de combustible (Matic, 2006).

Mientras que Europa está a punto de conseguir autos con un rendimiento promedio de 3 L de gasolina por cada 100 km, y mientras que llegan nuevas alternativas como la pila de combustible, para hacer posible el uso del hidrógeno o la propulsión eléctrica, el gas natural es una alternativa económica y ecológica probada y al alcance de varios países.

El gas natural comprimido para uso vehicular comenzó a utilizarse de forma importante a partir de 1944, al final de la segunda guerra mundial y ha demostrado a lo largo de los años un potencial exponencial de crecimiento por las enormes ventajas que representa.

Se espera que con el creciente interés en combustibles alternativos se sumen más de 50 millones de vehículos a gas natural en las carreteras del mundo durante los próximos 10 años. De esta manera se podría abarcar el 9% de la flota de transporte mundial hacia el año 2020 y el gas natural se convertiría en la elección más importante después de la gasolina y el gasoil. Entre los 11 millones de vehículos a GNV en circulación, existen motocicletas, triciclos, carretillas, camiones, ómnibus, tractores, remolcadores en aeropuertos, camiones recolectores de basura, locomotoras, e incluso trenes de hasta 150 ton en Australia, transbordadores, barcos de pesca, buques de carga, etc. Ninguna otra alternativa de combustible ha sido probada en tantas aplicaciones. Debido a esto, algunos países Europeos han tomado riendas en el asunto, a pesar de que son Pakistán, Argentina y Brasil los que tienen a mayor flota a nivel internacional (2.25, 1.8 y 1.6 millones de vehículos en circulación y 3, 000; 1, 858 y 1, 782 estaciones de servicio, respectivamente). En 2009, más de 130 mil vehículos a GNV fueron comprados en Italia, lo que representa más del 6% del total, además de las 17, 500 conversiones hechas después de adquiridos, llegando a más de 500 mil unidades en circulación y 732 estaciones de servicio (Silva, 1999).

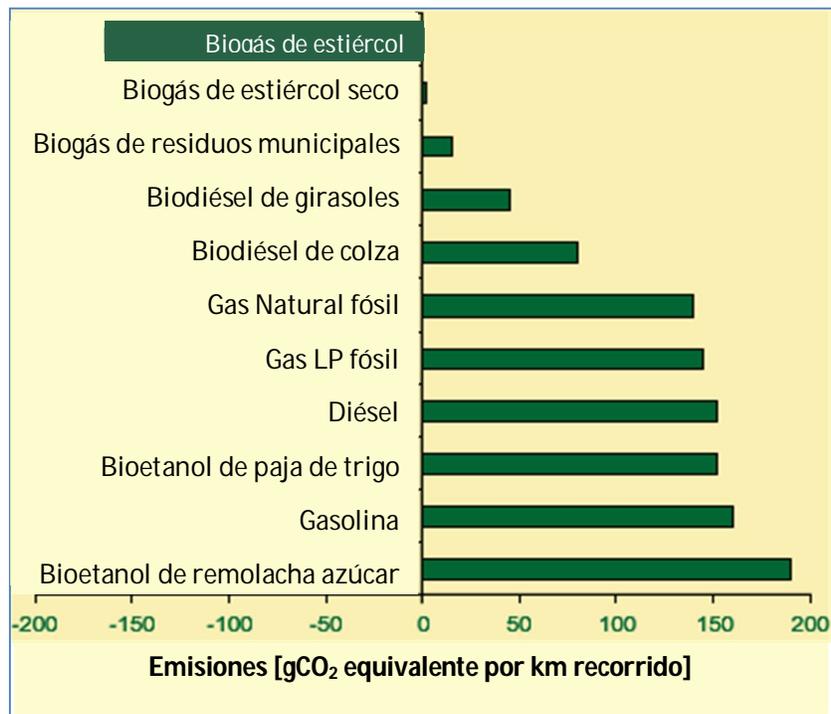
El gas natural es un hidrocarburo simple. Alrededor del 90% del gas natural es metano ( $\text{CH}_4$ ), que es el hidrocarburo más simple y puro que existe, pues cuando se quema una molécula de metano produce sólo una molécula de dióxido de carbono y dos moléculas de agua. Una buena comparación se puede realizar con la gasolina (Figura 2.20) que está compuesta por un gran número de hidrocarburos, y que en promedio por cada molécula quemada se producen al menos 8 moles de  $\text{CO}_2$ , además de los  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$ , que son los responsables de la lluvia ácida (ENGVA, 2008).



**Figura 2.20 Reducción de emisiones contaminantes respecto a la gasolina (ENGVA, 2008)**

Se han realizado comparaciones entre las diferentes alternativas energéticas que existen en la actualidad y existen discusiones importantes pues se ha demostrado que algunos de los llamados biocombustibles, en realidad generan más emisiones de las que se generan con la gasolina promedio. Por ejemplo, el bioetanol de paja de trigo genera tan sólo un ahorro global de 7% en comparación con la gasolina, pero el bioetanol proveniente de la

remolacha de azúcar genera 15% más emisiones (Figura 2.21). Adicionalmente, si comparamos la distancia que podría recorrer un automóvil prueba con la cantidad de combustible que se puede generar a través de las diferentes tecnologías, en tan sólo una hectárea de terreno (Figura 2.22). El metano generado de estiércol húmedo es el combustible más eficaz, pues ofrece 450% más energía por unidad de área (Edwards y col., 2006).



**Figura 2.21 Comparación de emisiones de diferentes biocombustibles (Edwards y col., 2006)**

El metano, es un combustible fósil al igual que el petróleo y se puede extraer de yacimientos subterráneos, de la desgasificación de los materiales del centro de la tierra o del biogás. De hecho, hoy en día el 60% de las emisiones de metano se deben a la acción biológica antropogénica por lo que es apremiante su captación y aprovechamiento (SENER, 2007).

Para utilizar el biogás en los vehículos es indispensable remover todos los compuestos que acompañan al metano. No basta reducir el ácido sulfhídrico con los métodos físicos, químicos, o biológicos convencionales, en esta aplicación es necesario alcanzar niveles de 99% de pureza a bajos costos, para que sea una alternativa interesante y no genere daños a los motores vehiculares que no están acostumbrados a trabajar en condiciones tan corrosivas.

Los métodos de depuración para biogás se clasifican de la siguiente manera:

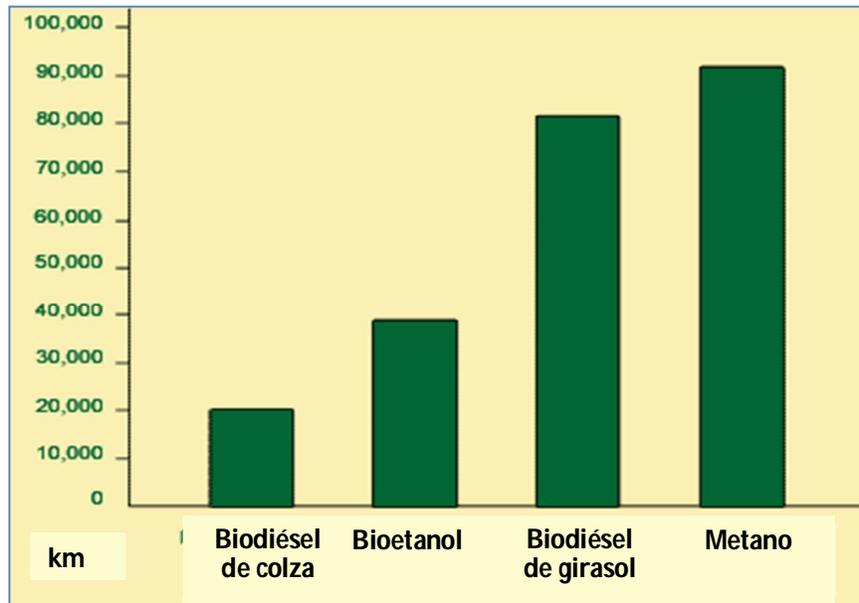
*Métodos de adsorción*

Éstos se basan en la captura selectiva de las impurezas del biogás con ayuda de materiales sólidos granulados, los cuales tienen una gran superficie específica. La aplicación de presiones elevadas mejora sustancialmente el resultado final.

Estos sistemas se utilizan principalmente para eliminar el agua el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno presentes en el biogás. El proceso más conocido utiliza un sistema donde el gas es comprimido de 60-100 psi, antes de ser introducido a una sistema de adsorción. Con esto se obtienen una eliminación de CO<sub>2</sub> a valores de 1-3% y H<sub>2</sub>S a concentraciones de alrededor de 4ppm (Llaneza y col., 2010).

### *Métodos de absorción*

Fundamentalmente aplicables al caso del H<sub>2</sub>S y el CO<sub>2</sub>. Se basan en la transferencia de masa entre la sustancia gaseosa a depurar y un líquido denominado absorbente que posee propiedades selectivas de absorción. El solvente habitual es el agua y se usan diferentes compuestos y sistemas para la depuración.



**Figura 2.22 Rendimiento por Ha de diferentes biocombustibles (Edwards y col., 2006)**

Uno de los procedimientos empleados para la eliminación del H<sub>2</sub>S y el CO<sub>2</sub>, consiste en la solución de sales aminas las cuales tienen un grupo amino NH<sub>2</sub> que se combina con el dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno para dar compuestos de hidrógeno carbonato, amoniaco (RNH<sub>3</sub>)CO<sub>3</sub> y azufre con amoniaco (RNH<sub>3</sub>)S, pero tiene la dificultad de ser un método muy costoso.

En un tanque columna (Scrubber) se emplean soluciones de carbonato (carbonato de potasio o sodio) y en ellas se logra reducir el sulfuro de hidrógeno. Estos sistemas sí utilizan el aumento de presión para mejorar la eficiencia.

También se han empleado soluciones acuosas alcalinas. Su principal ventaja consiste en que los problemas de corrosión y formación de espuma lo hacen menos costoso. Sin embargo, el agente antiespumante hace que el equipamiento y operación sean más complicados. Además requiere de grandes cantidades de energía para bombear la solución y los gases. (Kirk y Othmer, 2007).

### *Métodos de separación por membrana*

Este proceso se basa en la difusión de ciertos compuestos que pasan a través de una membrana selectiva. Con el objeto de facilitar la difusión se emplea un portador. La permeabilidad del gas a través de la membrana es función de la solubilidad y difusividad del gas en el material de la misma. Permite separar diferentes gases en función de la membrana, tales como el CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, el H<sub>2</sub> y otros hidrocarburos y gases ligeros.

Diferentes filtros de membranas han sido probados para la separación del sulfuro de hidrógeno y el dióxido de carbono. Los equipos y la operación de este método son simples, sin embargo, la eficiencia de la separación por membrana es baja y el costo de la misma elevado, además hay que aplicar grandes presiones. Sin embargo es una tecnología en constante mejora e innovación por lo que no debería descartarse su uso en el mediano plazo (Llaneza y col., 2010).

### *Métodos biológicos*

Se llevan a cabo mediante la acción de determinados microorganismos tales como bacterias sulfurooxidantes que llevan el sulfuro a azufre metálico (CETER, 2005). Se conocen muchos microorganismos que habitan en lugares húmedos y que son consumidores de H<sub>2</sub>S como fuente nutricional cubriendo sus alrededores con azufre elemental. Estos tienen preferencia por las aguas residuales y nunca dejan de crecer y multiplicarse mientras las condiciones ambientales lo permitan, pueden vivir tanto en presencia como en ausencia de oxígeno, aunque hay ciertos factores que favorecen su existencia como son: Humedad, presencia de oxígeno y líquido residual para poder transportarse.

Un ejemplo de este tipo de procesos es la tecnología conocida como filtros de percolación. Que utiliza biotecnologías que reducen considerablemente las concentraciones de H<sub>2</sub>S hasta niveles de 50 ppm. Como parte esencial de estos sistemas se pueden emplear algas a nivel micro o macro.

### *Métodos de eliminación de CO<sub>2</sub>*

La eliminación de CO<sub>2</sub> incrementa el valor calorífico y lleva a una calidad del gas similar a la del gas natural. Lo más importante cuando se aplican éstas técnicas de eliminación, es minimizar las pérdidas de metano por razones económicas o ecológicas, ya que la contaminación por este gas es importante.

La separación criogénica es utilizada con base en el punto de fusión del CH<sub>4</sub>, que es de aproximadamente -160°C a 1 atm, mientras que el CO<sub>2</sub> tiene un punto de -78°C, El CO<sub>2</sub> puede ser eliminado entonces, enfriando la mezcla del biogás a elevada presión. El biogás producido contendría más de 97% de metano pero los elevados costos y la inversión necesaria han limitado su aplicación (Llaneza y col., 2010).

La separación por membranas sólidas, fabricadas a partir de polímero acetato-celulosa, presenta permeabilidades del CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>S de 20-60% mayores a las del metano; sin embargo, requieren de presiones de más de 25 bar, además el flujo de gas a través de la membrana se incrementa proporcionalmente con la diferencia de presión, de esta manera la membrana se reduce y hay un máxima de presión que puede resistir. Se pueden provocar pérdidas de metano por las moléculas que quedaron atrapadas en la membrana, pero esa energía puede recuperarse si es posible la quema de la membrana en la cogeneración.

Otras técnicas están en investigación, tales como la conversión química, por ejemplo, la reacción catalítica de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$  a  $\text{CH}_4$ . Este proceso es extremadamente costoso y la necesidad de  $\text{H}_2$  hace que el proceso no sea adecuado.

Otra alternativa es el enriquecimiento del biogás a través de la recirculación de  $\text{CO}_2$ . Los lodos provenientes de la cámara de digestión se ponen en contacto con el aire. El dióxido de carbono que está disuelto en los lodos es liberado. El lodo pobre en  $\text{CO}_2$  se introduce de nuevo en la cámara donde más dióxido de carbono es absorbido en los lodos, resultando en biogás enriquecido de metano. Pruebas realizadas en Suecia, han demostrado que es posible diseñar un sistema que incremente el contenido de metano al 95% con pérdidas de menos de 2% (Llaneza y col., 2010).

#### *Métodos de purificación comerciales*

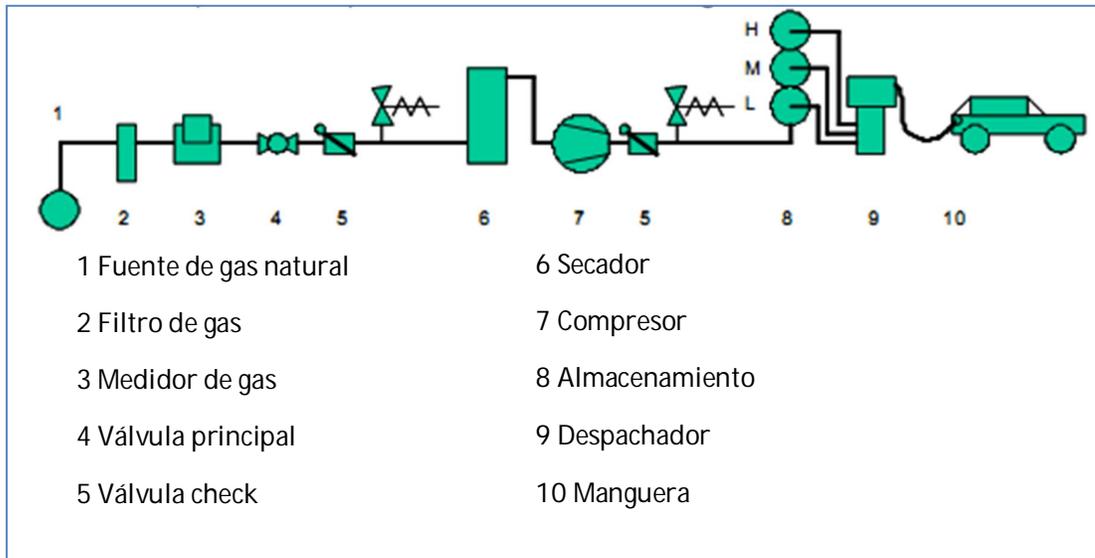
La empresa internacional Greenlane® con plantas en Inglaterra, Suecia y Alemania, y con distribuidores en todos los continentes, ofrece una combinación entre el sistema avanzado de tanques de agua presurizada y filtración biológica para eliminar el dióxido de carbono al mismo tiempo que el ácido sulfhídrico, amoníaco y otros contaminantes.

La compañía GTS® tiene más de 50 años de experiencia en la purificación y tratamiento de biogás y ofrece diferentes paquetes modulares para la eliminación de componentes específicos, que pueden ser ensamblados en una línea para tener la solución completa. Por ejemplo, su sistema GPP® consiste de 4 pasos: El biogás es comprimido a una presión de 16-25 bar y en seguida enfriado a  $-25^\circ\text{C}$ . Durante este proceso, la humedad, el  $\text{H}_2\text{S}$ , siloxanos y otros contaminantes, son totalmente removidas. Después, el gas purificado pasa por un filtro coalescente y luego llevado a través de SIOXIA® para eliminar los contaminantes que restaban hasta los niveles especificados. Finalmente, el gas es enfriado hasta  $-78^\circ\text{C}$  y el  $\text{CO}_2$  líquido es colectado.

Una vez que el biogás ha sido depurado ya tiene el poder calorífico apto para poder llevarlo al proceso de comercialización como combustible vehicular a través de los siguientes sistemas de despachado.

Estación de llenado lento: En este sistema, un pequeño compresor conectado directamente a la red de gas, comprime y llena directamente los tanques a través de tubos flexibles de llenado. El vehículo no puede arrancar durante el lleno. Una vez que la presión final es alcanzada, el compresor se apaga automáticamente. Este sistema es recomendado para flotillas que regresan a una central o para vehículos privados los cuales pueden ser recargados en casa ya que el tiempo usual de llenado es de 6-8 horas.

Estación de llenado rápido (Figura 2.23): Es este tipo de estaciones, el gas siempre se encuentra a presiones de 200-300 bar en cilindros de almacenamiento especiales que sirven de intermediario. Después una unidad despachadora lleva el gas comprimido hasta el vehículo en un par de minutos. Esto significa que siempre y cuando haya un banco de almacenamiento previo, una estación de este tipo puede alcanzar los tiempos de despachado de las estaciones de gasolina convencionales. En términos generales, una estación de llenado rápido puede incrementar hasta en 20% la capacidad de almacenamiento de los vehículos debido a que cuando entra el gas al tanque comprime rápidamente el que se encuentra dentro, aumentando la temperatura y reduciendo la densidad. Esto no se manifiesta cuando se llenan tanques totalmente vacíos ya que se produce el efecto contrario: Un gas con presión muy alta entra en contacto con un medio más grande y se expande rápidamente lo que baja su temperatura y aumenta su densidad.



**Figura 2.23 Esquema de una estación de llenado rápido de gas natural para automóviles (Ferré y Fuchs, 2009)**

La diferencia entre los dos tipos de estaciones de llenado radica en que la de llenado lento no cuenta con un almacenamiento intermedio ni una unidad despachadora especial por lo que es más económica (Matic, 2006).

Estaciones madre-hija de llenado (Figura 2.24): Son muy comunes en ubicaciones fuera de los alcances de la red. Lo que se hace es transportar el gas natural en tanques a alta presión (hasta 350 bar) llenados en una instalación central, hasta instalaciones *hijas* que se encuentren en la periferia. Los bancos de tanques de almacenamiento son transportados por camiones hasta las estaciones periféricas a un costo relativamente bajo.



**Figura 2.24 Tráiler para transportar bancos de gas natural (Ferré y Fuchs, 2009)**

La condición ideal para aprovechar todas las ventajas del gas natural vehicular (GNV) es que se utilice un motor conforme a sus propiedades. Desafortunadamente aunque existen desarrollos de motores para uso exclusivo de GNV, estos no se han producido ni se han comercializado en la misma escala de los diésel o gasolina que continúan predominando. Algunos fabricantes que han desarrollado y comercializado vehículos exclusivos para GNV son: Ford, Honda, General Motors y Mercedes Benz, en el mercado de los vehículos

livianos, y Renault y Volvo en el de buses de transporte público. Además, Caterpillar y Cummins han desarrollado sus motores para equipamiento industrial (Matic, 2006).

Uno de los obstáculos que se tienen que superar a fin de que el uso del GNV comience a generalizarse en todas partes, es la creación de una infraestructura de estación de servicio, que puedan proporcionar una amplia disponibilidad de combustible. Ante esta situación, la industria del GNV creó sistemas duales de conversión de vehículos, que permiten que el cambio entre combustibles se realice de forma manual o automática cuando se detecta que el gas en el almacenamiento está por agotarse, evitando que los usuarios tengan que recorrer enormes distancias para cargar combustible en caso de una emergencia o situación extra (Hollemeak, 2005).

Los sistemas de conversión están actualizados siguiendo la evolución de la tecnología introducida por la industria automotor, lo que permite que todo el universo de vehículos sea convertible a GNV. Para estudiar la evolución de los sistemas de conversión se definen las siguientes categorías o generaciones tecnológicas (Ferré y Fuchs, 2009):

*Sistemas de combustible GNV aspirado y de lazo abierto* (También denominados de primera y segunda generación): La primera generación de conversión a GNC es la que se destinó a los vehículos con carburador y encendido con platinos y bobina de ignición.

Se introducía la mezcla de gas/aire en la proporción definida mecánicamente, mediante un dispositivo auxiliar mezclador colocado en la entrada de aire al motor. Se sigue utilizando en vehículos con carburador (Ford Falcon, Fiat Uno, Peugeot 404, Peugeot 504, Peugeot 505, Renault 9, Renault 12, Renault 18, etc.)

Para los vehículos que sustituyeron la alimentación de combustible al motor con carburador por el sistema de inyección, la tecnología GNC introdujo dispositivos electrónicos que emulan, es decir imitan las señales que envían a la computadora del vehículo, los componentes del sistema de inyección de combustible (inyectores, sensores, etc.).

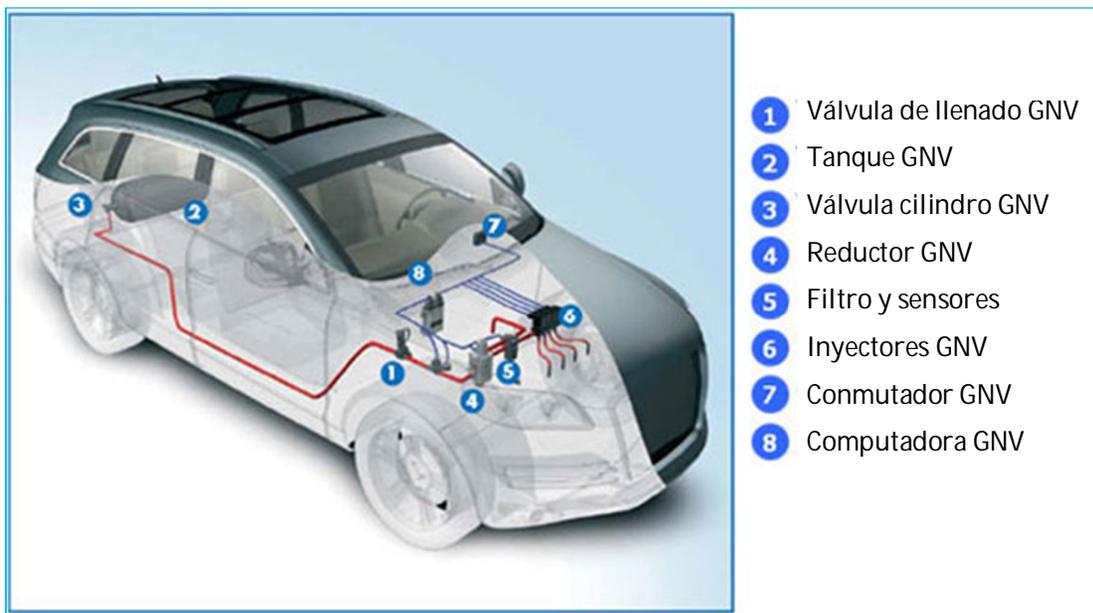
*Sistema de combustible GNV de lazo cerrado* (También denominado de tercera generación): Este sistema se diferencia del de lazo abierto de modo tal que los sensores del motor actúan sobre el control electrónico del equipo de gas, que a su vez acciona un motor de "paso a paso" que dosifica electrónicamente el gas que necesita el motor de acuerdo con el requerimiento de marcha para un óptimo funcionamiento.

*Sistema de combustible GNV de inyección secuencial* (También denominado de Cuarta o Quinta Generación): Es el sistema de mayor avance tecnológico y su funcionamiento es similar al del sistema de inyección secuencial de gasolina del vehículo a convertir. El regulador entrega gas a alta presión y se inyecta a cada cilindro en forma secuencial, tal como ocurre con la gasolina. El funcionamiento es controlado por la computadora del vehículo que genera las señales de inyección y por una computadora propia del equipo de conversión que las interpreta para comandar la inyección de gas. De este modo el funcionamiento del vehículo es igual en gas que en gasolina. Este sistema es el que utilizan las fábricas automotrices para sus vehículos a gas originales y está disponible en México sólo a través de importadores como Incogás S.A. y Gazel®.

En la Figura 2.25 se pueden observar algunos de los componentes de estos sistemas, que se usan en modelos de vehículos a partir de 2008, o algunos anteriores que ya contaban con un módulo secuencial de inyección y diseños avanzados.

La utilización de GNV en los vehículos presenta en general las siguientes ventajas con respecto a la gasolina:

- **Seguridad.** Es más ligero que el aire, por tanto, en caso de fugas o accidentes se disiparía fácilmente en la atmósfera evitando explosiones.
- **Sustentabilidad.** Su combustión es más limpia que la de la gasolina por lo que reduce las emisiones.
- **Economía.** La utilización de metano es una opción económica pues tiene un mayor octanaje (110) que la gasolina Magna (87) o la Premium (92), lo que hace que la combustión sea más eficiente. Cuando la relación de compresión en los motores es elevada, se minimizan las explosiones o cascabeleos ya que el combustible se enciende en el momento óptimo, esto reduce el daño en el motor y por ende alarga su vida útil. Reduce los mantenimientos como el cambio de aceite y bujías por su composición tan pura. Puede ser comercializado a un menor precio que la gasolina.



**Figura 2.25 Componentes de un sistema de conversión a metano en el automóvil (Ferré y Fuchs, 2010)**

## 2.8 Evaluación financiera de proyectos de inversión

Para realizar la evaluación financiera de pre-factibilidad de cualquier proyecto se deben considerar los siguientes aspectos:

*Inversiones fijas.* Las inversiones en activo fijo son todas aquellas que se realizan en los bienes tangibles que se utilizarán en el proceso de transformación de los insumos o que sirvan de apoyo a la operación normal del proyecto. Constituyen activos fijos entre otros, los terrenos y recursos naturales, las obras físicas (edificios industriales, salas de venta, oficinas administrativas, vías de acceso, estacionamientos, bodegas, etc.); el equipamiento de planta (maquinaria, muebles, herramientas, vehículos y mobiliario general), y la infraestructura de servicios de apoyo (agua potable, desagües, red eléctrica, comunicaciones, energía, etc.).

Para efectos contables, los activos fijos, con la excepción de los terrenos, están sujetos a depreciación, la cual afectará al resultado de la evaluación por su efecto sobre el cálculo de los impuestos. Los terrenos no sólo no se deprecian, sino que muchas veces tienden a aumentar su valor por la plusvalía generada por el desarrollo urbano que se genera a su alrededor como en sí mismos. También puede darse el caso de una pérdida en el valor de mercado de un terreno, como es el que correspondería cuando se agota la provisión de agua de riego o cuando el uso irracional de tierras de cultivo daña su rendimiento potencial (Sapag y Sapag, 1991).

Los activos fijos son bienes que poseerá la compañía o que se le adeudan a ésta. Son inversiones de largo plazo cuya conversión a efectivo representaría una reorientación de la empresa (Tarquin y Blank, 2006). También se conocen en la contabilidad financiera como recursos tangibles, pues son inversiones que se pueden ver, tocar y depreciar.

*Inversión inicial diferida.* Las inversiones diferidas son todas aquellas que se realizan sobre activos constituidos por los servicios o derechos adquiridos para la puesta en marcha del proyecto. Constituyen inversiones intangibles susceptibles de amortizar que, al igual que la depreciación, resta flujo de efectivo de la base para el cálculo de los impuestos. Los principales ítems que configuran esta inversión son los gastos de organización, patentes y licencias, los gastos de puesta en marcha, la capacitación, los imprevistos, los intereses y los cargos financieros preoperativos (Sapag y Sapag, 1991).

Se incluyen gastos de organización, que se dividen en el pago de los derechos para constituir la empresa que operará el proyecto y los gastos de puesta en marcha, que son todos aquellos que deben realizarse al iniciar el funcionamiento de las instalaciones, hasta que las mismas alcancen su funcionamiento adecuado. A pesar de ser gastos operativos requieren un desembolso previo al momento de la puesta en marcha del proyecto. También se incluyen en esta categoría los pagos de remuneraciones, arriendos, publicidad, seguros y cualquier otro gasto previo que se realice.

*Inversiones en circulante.* Las inversiones en activos circulantes necesarias para la ejecución del proyecto dentro de un ciclo productivo, constituyen lo que en evaluación de proyectos se denomina Capital de Trabajo.

Un ciclo productivo es el proceso que se inicia con el primer desembolso para cancelar los insumos de la operación y termina cuando se obtiene el efectivo por la venta de los insumos transformados en productos terminados, quedando efectivo nuevamente para la cancelación de la nueva orden de insumos (Sapag y Sapag, 1991).

El cálculo del capital de trabajo óptimo se sustenta en la suposición de que tanto un déficit como un exceso de liquidez representan costos para las compañías. Para explicar el primer caso se debe tomar en cuenta que dentro de cada periodo de operación la empresa tiene gastos y costos de la operación misma que debe subsanar de manera obligatoria, por lo que en caso de no tener el efectivo disponible, incurrirá en multas o sanciones que representarán un egreso. Si la empresa recurre a un préstamo, deberá cubrir el costo de capital que el banco o inversionista fije de manera proporcional al tiempo de pago. En el caso de tener un exceso de capital se estará incurriendo en costos de pérdida de oportunidad, debido a que se mantiene dinero ocioso que de ser invertido en alguna cuenta o proyecto podría generar una tasa de interés a favor de la empresa.

Para mantener un nivel óptimo de efectivo se debe contar con información muy precisa acerca de las fuentes de financiamiento disponibles para la empresa, los parámetros de la competencia y los proveedores, así como la estructura interna de costos que se deriven de la operación diaria.

Para los alcances de este estudio se limitará al método del periodo de recuperación que consiste en determinar el monto que representarían los costos de operación que se deben financiar desde el momento en que se efectúa el primer pago por la adquisición de la materia prima hasta el momento que se recauda el ingreso por la venta de los productos (Sapag y Sapag, 1991).

$$\text{Capital de Trabajo} = C_p(\text{Duración ciclo}) \quad (2-2)$$

Donde  $C_p$  es el costo promedio diario de operación y la duración del ciclo, por supuesto se escribe en días.

*Costos.* Los costos se pueden dividir en dos categorías: Fijos y variables. Los primeros son conocidos como *gastos* y la suma de los segundos se conoce como *costo de lo vendido*.

Los costos fijos son aquellos que no varían con respecto a los niveles de producción, es decir, producen erogaciones para la empresa de la misma magnitud si se produce al 5 o al 100% de la capacidad de la planta. Los variables por su parte, están íntimamente relacionados con cada unidad producida.

*Estado de Resultados.* El estado de resultados es uno de los estados financieros más importantes. Nos permite hacer un análisis de rentabilidad, ya que resume las utilidades o las pérdidas de la corporación (Tarquin y Blank, 2006).

Interés significa la renta que se paga por utilizar dinero ajeno, o bien, la renta que se gana al invertir nuestro dinero. Puesto que el dinero puede ganar un cierto interés cuando se invierte por un cierto periodo, es importante reconocer que un peso que se reciba en el futuro tendrá un valor diferente del que tiene actualmente. Un peso que se tenga actualmente puede acumular interés durante un año, mientras que un peso recibido en un año no nos generaría ningún interés. Por consiguiente, el valor del dinero a través del tiempo significa que cantidades iguales de dinero no tienen el mismo valor, si se encuentran en puntos diferentes del tiempo y si la tasa de interés es mayor que cero.

La *Tasa Interna de Rendimiento*, como se le llama frecuentemente, es un índice de rentabilidad ampliamente aceptado (Coss Bu, 2008). Está definida como la tasa de interés que reduce a cero el valor presente, el valor futuro, o el valor anual equivalente de una serie de ingresos y egresos. Es decir, la tasa interna de rendimiento de una propuesta de inversión es aquella tasa de interés  $i^*$  que satisface cualquiera de las siguientes ecuaciones:

$$\sum_{t=0}^n \frac{S_t}{(1+i^*)^t} = 0 \quad (2-3)$$

$$\sum_{t=0}^n S_t (1+i^*)^{n-t} = 0 \quad (2-4)$$

Donde:

$$S_t = \text{flujo de efectivo neto del periodo } t$$

$$n = \text{vida de la propuesta de inversión}$$

Siendo la TIR una medida de la rentabilidad del proyecto sobre flujos de efectivo en el tiempo, lo primero es elaborar el estado de flujo de efectivo.

Como se ha mencionado antes, la depreciación representa un costo ficticio, de hecho se considera un flujo positivo para el proyecto, además de la reducción de la carga fiscal por la reducción de la base gravable para el impuesto sobre la renta (ISR) y la repartición de utilidades a los trabajadores (RUT). En este punto lo que se evalúa es en realidad el dinero que entra o sale de la empresa a lo largo del tiempo, es por esto que la TIR es una medida de rentabilidad mucho más efectiva que los índices de rentabilidad del estado de resultados. Además una buena planeación fiscal puede reducir en gran medida los impuestos a pagar presentando resultados muy bajos o incluso negativos, lo que hace completamente estéril la medida de utilidades netas en la eficiencia de la empresa.

La manera más dura de evaluar un proyecto de inversión con respecto al tipo de financiamiento, es tomar los resultados de no recibir el mismo, es decir, evaluar la propuesta como si se fuera a capitalizar totalmente por la empresa, así la inversión inicial necesaria se tomará como un flujo negativo de efectivo al 100% y no se reducirá la base gravable para el cálculo de impuestos, lo que generalmente eleva la TIR, volviendo al proyecto más atractivo, de lo que en realidad representa.

Para que una inversión sea rentable, el inversionista (una corporación o individuo) espera recibir una cantidad de dinero mayor a lo que originalmente se invirtió. En otras palabras debe ser posible obtener una tasa de retorno o rendimiento sobre la inversión. La tasa razonable recibe el nombre de *tasa mínima de retorno atractiva* (TMRA) y es superior a tasas que ofrecen los bancos o alguna inversión segura que implique un riesgo mínimo.

La TMRA también recibe el nombre de tasa base para proyectos; es decir, que para que se considere viable desde el punto de vista financiero, la TIR esperada debe ser mayor o igual al TMRA o tasa base. La TMRA es una tasa establecida por la dirección (financiera) y se utiliza como criterio para valuar la TIR de una alternativa, en el momento de tomar decisiones de aceptación o rechazo (Tarquin y Blank, 2006).

Para determinar un valor para la TMRA se debe incluir el concepto costo de capital. En general, el capital se obtiene de dos formas, por financiamiento de patrimonio o por financiamiento de deuda. El primero se refiere a utilizar fondos propios como las cuentas de efectivo corriente, ventas de existencia o utilidades acumuladas. El financiamiento de deuda se refiere a los préstamos de fuentes externas, en donde se reembolsa el capital y los intereses conforme a un programa como los bonos, préstamos, hipotecas, capital de riesgo etc.

El *costo promedio ponderado del capital* (CPPC) es un balance de los diferentes costos de financiamiento que utiliza una empresa y el monto de participación al que corresponde. El valor de la TMAR debe ser mayor que el CPPC y algunos factores a considerar son: Riesgo del proyecto, oportunidad de inversión, estructura tributaria, limitación de capital, tasas del mercado y la situación macroeconómica en la región.

*Valor Presente Neto.* El valor presente neto es uno de los criterios económicos más ampliamente utilizados en la evaluación de proyectos de inversión. Consiste en determinar la equivalencia en el tiempo cero de los flujos de efectivo futuros que genera un proyecto y comparar esta equivalencia con la inversión inicial. Cuando dicha equivalencia es mayor que el desembolso inicial, entonces, es recomendable que el proyecto sea aceptado (Coss Bu, 2008).

Para transportar los flujos de efectivo a través del tiempo, al periodo cero, se utiliza la siguiente expresión:

$$VPN = S_0 + \sum_{t=1}^n \frac{S_t}{(1+TMRA)^t} \quad (2-5)$$

Donde:

*VPN = valor presente neto*

*S<sub>0</sub> = inversión inicial*

*S<sub>t</sub> = flujo de efectivo en el periodo t*

*n = número de periodos de la vida del proyecto*

*TMRA = Tasa mínima de rendimiento atractiva*

*Índice Beneficio-Costo:* La razón Beneficio-Costo se considera el método de análisis fundamental para proyectos del sector público. Se diseñó para aumentar la objetividad en la evaluación de proyectos que no generen una rentabilidad comercial sobresaliente y sí una rentabilidad social, ambiental y política.

Existen diversas variaciones del índice B/C pero el enfoque fundamental es el mismo. Todos los cálculos de costos y beneficios deberán convertirse a una unidad monetaria de equivalencia común en el tiempo.

El modelo que más se adapta al proyecto es el siguiente:

$$I_{B/C} = \frac{\text{Beneficios netos} - \text{contrabeneficios}}{\text{inversión inicial}} \quad (2-6)$$

## 2.9 Protocolo de Kioto

Los gobiernos acordaron en 1997 el Protocolo de Kioto del Convenio Marco sobre Cambio Climático de la ONU (UNFCCC). El acuerdo ha entrado en vigor el 16 de febrero de 2005, sólo después de que 55 naciones que suman el 55% de las emisiones de gases de efecto invernadero lo han ratificado. En la actualidad 166 países, lo han ratificado, como lo indica el barómetro de la UNFCCC.

El objetivo del Protocolo de Kioto es conseguir reducir un 5,2% las emisiones de gases de efecto invernadero globales sobre los niveles de 1990 para el periodo 2008-2012. Este es el único mecanismo internacional para empezar a hacer frente al cambio climático y minimizar sus impactos.

Los instrumentos creados en el Protocolo de Kioto son el Mecanismo de desarrollo limpio (MDL), Implementación conjunta (IC) y el mercado para la Transacción de Emisiones. El primero toma especial relevancia para el desarrollo de este trabajo ya que los proyectos que se basan en la digestión anaerobia en el entorno nacional, cumplen con los requisitos para acceder al mercado de carbono.

## **2.10 Mecanismos de desarrollo limpio (MDL)**

El MDL permite realizar proyectos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en países que no disponen de objetivos de emisiones según la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y el Protocolo de Kioto, ni son firmantes.

El MDL fomenta las inversiones responsables desde los países industrializados hacia los países en vías de desarrollo por medio de aplicar los rigurosos criterios prescritos por el consejo ejecutivo del MDL de la CMNUCC:

- Desarrollo sustentable. Los proyectos deben cumplir los requisitos para el desarrollo medioambiental, social y económico
- Adicionalidad. Los proyectos deben demostrar que sin el MDL en funcionamiento no podrían avanzar. Deben ofrecer recortes o evitar las emisiones más allá de las 'operaciones cotidianas'
- Aprobación del país anfitrión. Los proyectos deben aprobarse por la autoridad nacional designada en el país 'anfitrión' del proyecto
- Evaluación del impacto medioambiental (EIM). Determina si el proyecto daña o no al entorno

Los gobiernos u organizaciones utilizan los certificados de reducción de emisiones (CRE) de los proyectos del MDL como ayuda al cumplimiento de los objetivos de emisión de gases de efecto invernadero del Protocolo de Kioto.

Los proyectos del mecanismo de desarrollo limpio se deben validar antes de su comienzo y un tercero independiente debe verificarlos posteriormente cada año. Para el MDL, estos organismos se denominan entidades operativas designadas (EOD) y deben contar con la acreditación del consejo ejecutivo del MDL de la CMNUCC.

### Ciclo del Proyecto MDL

#### Paso 1. Producción del documento de diseño del proyecto (DDP)

- Diseño del Proyecto
- Preparación del DDP

#### Paso 2. Validación/Aprobación para cada parte involucrada

- Selección de EOD
- Validación
- Aprobación por la parte anfitriona
- Producción de informe de validación.

#### Paso 3. Registro

- Solicitud para registro
- Determinación de aprobación
- (Si es probado) Registro
- (Si no es aprobado) Solicitud de una revisión

Paso 4. Implementación/Operación del monitoreo del Proyecto

- Implementación del proyecto
- Monitoreo

Paso 5. Verificación/Certificación

- Selección del DOE
- Verificación
- Certificación/ Solicitud para la emisión

Paso 6. Emisión de CER

- (Si es aprobado) Emisión de CERs
- (Si no es aprobado) Solicitud para revisión
- Dedución de "cuota de beneficios"

Paso 7. Expedición (Distribución de CERs)

- Expedición
- Distribución de CERs

## **2.11 Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética**

El objetivo de esta ley es establecer las bases para la generación de energía eléctrica con base en las tecnologías limpias que hacen posible el uso de energía renovable. En el marco de esta estrategia se definen puntos particulares para cada tecnología contemplada y por su puesto hay una sección dedicada a Bioenergéticos.

## **2.12 Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos**

Algunos de los objetivos de esta ley son:

- Promover la producción de Bioenergéticos a partir de actividades agropecuarias, forestales, algas, procesos biotecnológicos y enzimáticos del campo mexicano.
- Desarrollar la producción, comercialización y uso eficiente de Bioenergéticos para la reactivación del sector.
- Promover el desarrollo regional.
- Procurar la disminución de la emisión de contaminantes.

Según esta ley, los Bioenergéticos son combustibles obtenidos de biomasa, como la materia orgánica proveniente de las actividades agrícolas, pecuarias, silvícolas, acuacultura, algacultura, de los residuos, de microorganismos, de enzimas o sus derivados que cumplan con las especificaciones y normas vigentes dispuestas por las autoridades competentes. Se clasifican de la siguiente manera:

1. Biodiésel. Combustible que se obtiene por la transesterificación<sup>7</sup> de aceites de origen vegetal o animal.
2. Biogás. Mezcla de gases producidos en la descomposición de la materia orgánica.

Para desarrollar actividades de producción, almacenamiento, transporte y distribución por ductos, así como la comercialización de Bioenergéticos, las entidades se tendrán que sujetar a permisos sólo establecidos por la SENER.

---

<sup>7</sup> Síntesis orgánica mediante la cual se lleva a cabo el intercambio de un grupo alcoxi de un éter por otro alcohol, produciendo un éter diferente y un nuevo alcohol.

## 2.13 Normas Oficiales Mexicanas

Para el desarrollo de este proyecto se deben contemplar los lineamientos federales y estatales en materia, así como también a las siguientes Normas Oficiales Mexicanas (NOMs).

- a) Para el aprovechamiento del biogás como combustible en automotores:
  - i. NOM-001-SECRE-2010. Características del gas natural. (Comisión reguladora de energía).
  - ii. NOM-002-SECRE-2002. Instalaciones para aprovechamiento de GN.
  - iii. NOM-003-SECRE-2002. Distribución de Gas Natural por ductos.
  - iv. NOM-004-SECRE-1997. Gas Natural licuado, Instalaciones vehiculares.
  - v. NOM-005-SECRE-97. Gas Natural Licuado, Estaciones de servicio.
  - vi. NOM-006-SECRE-1999. Odorización del Gas Natural.
  - vii. NOM-008-SECRE-1999. Control de la corrosión en tuberías de GN.
  - viii. NOM-009-SECRE-1999. Monitoreo, detección y clasificación de fugas.
  - ix. NOM-010-SECRE-2002. Gas natural comprimido para automotores, requisitos mínimos de seguridad para estaciones de servicio.
  - x. NOM-011-SECRE-2002. Gas natural comprimido, requisitos mínimos en instalaciones vehiculares.
  - xi. NOM-031-SCFI-1994. Requisitos mínimos de seguridad para estaciones de servicio y vehiculares de gas natural. (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial).
  - xii. NOM-094-SCFI-1994. Instalaciones vehiculares para uso de GN licuado en automotores.
- b) Para el aprovechamiento de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) como sustrato para la digestión se debe tener en cuenta la siguiente normatividad:
  - i. NMX-AA-015-1985. Método de cuarteo para RSU.
  - ii. NMX-AA-022-1985. Selección y cuantificación de subproductos.
  - iii. NMX-AA-061-1985. Determinación de la generación.
- c) Las siguientes están vigentes exclusivamente en el Estado de México, sin embargo son una buena referencia:
  - i. NTEA-001-SEGEM-AE-2003. Establece los requisitos para el tratamiento y disposición final de residuos orgánicos generados en centros de sacrificio para consumo humano.
  - ii. NTEA-006-SMA-RS-2006. Establece los requisitos para la producción de mejoradores de suelo elaborados a partir de RSU.
- d) Por último aplican las siguientes normas generales para cualquier entidad que emita agua residual.
  - i. NOM-001-SEMARNAT-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en agua y bienes nacionales.
  - ii. NOM-002-SEMARNAT-1996. Límites máximo permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

Si bien es cierto que se han presentado una gran cantidad de normas y reglamentos a los que hay que ajustarse, además de los que no se han mostrado, éstas sirven de referencia para el óptimo desarrollo de proyectos; para que puedan cumplir con los dictámenes técnico-ambientales que se requieren para los permisos de construcción y además para dimensionar de mejor forma las instalaciones, ya que todos los proveedores de equipos deben ajustarse a normatividades como las presentadas y no se estará exigiendo algo que ellos no puedan cumplir y que sea económicamente viable de producir.

## 2.14 Análisis ambiental de un proyecto

El estudio ambiental se enfoca principalmente en dos temas: El análisis del impacto del proyecto sobre el medio ambiente (con el fin de minimizar afectaciones causadas por el proyecto) y el análisis del efecto del entorno sobre el proyecto, éstos se resumen en un documento conocido como Estudio de Impacto Ambiental (EIA), el cual es requisito indispensable para acceder a fondos de la banca de desarrollo.

En el caso de proyectos para el manejo de residuos sólidos urbanos, la importancia de los impactos ambientales asociados depende de las condiciones particulares de la localización, geomorfología y demás características del medio físico, biótico y social, así como de las características de los materiales a tratar. De manera general, un proyecto para RSU puede producir impactos sobre las aguas, el aire, el suelo, la flora, la fauna y los ecosistemas.

Para medir estos impactos, el proceso que recomienda el Banco Interamericano de Desarrollo consta de tres niveles:

*Evaluación de Impacto Preliminar (EIP).* Resulta de una lista de verificación, a partir de informaciones y datos existentes, y revela si es necesario, por la magnitud y trascendencia de los impactos de una actividad dada, realizar una evaluación más detallada.

*Evaluación complementaria de impactos (ECI).* Se realiza cuando es necesario profundizar los estudios sobre el impacto de algún determinado efecto sobre el medio o sobre la salud humana. En general, en este tipo de evaluación se usan investigaciones básicas para determinar la acción de una sustancia sobre un medio específico.

*Estudio de Impacto Ambiental (EIA).* La elaboración de este estudio, cuya función primordial es ayudar a la toma de decisiones, se constituye por un conjunto de etapas y tareas a cumplir, que genéricamente se concretan en los siguientes rubros (SEMARNAT, 2002):

1. Descripción del proyecto o actividad
2. Desglose del proyecto o actividad en sus partes elementales
3. Descripción del estado que caracteriza al ambiente previo
4. Elementos más significativos del ambiente
5. Ámbito de aplicación del Estudio de Impacto Ambiental
6. Identificación de impactos
7. Alternativas
8. Identificación de medidas de mitigación
9. Valoración de impactos residuales
10. Plan de vigilancia y control

Es posible descargar los formatos o guías correspondientes a la actividad que se desea realizar, directamente del sitio web de SEMARNAT para obtener más información acerca de los trámites y los requisitos particulares para cada tipo de proyecto.

## CAPÍTULO 3

### ESTUDIO DE CASO

Se ha revisado la problemática ambiental general que se vive actualmente y (calentamiento global) y los efectos negativos de la falta de planes de manejo integral de los Residuos Sólidos Urbanos a nivel. Se analizó la relación que existe entre la falta de tratamiento y correcta disposición de los residuos, sobre todo por el alto contenido orgánico en los RSU, que caracteriza a nuestro país. En realidad es la falta de conciencia en la separación de los residuos orgánicos los que dificulta y encarece los procesos de tratamiento y lo que contribuye con gases de efecto invernadero. Según datos del INE, el 23.6% del metano producido en México proviene de los rellenos sanitarios y el 26% proviene de los residuos agrícolas y su fermentación, que además se sabe tiene un potencial 21 veces mayor que el CO<sub>2</sub> como gas de efecto invernadero.

Se ha revisado es el Plan de Desarrollo Municipal de diversas regiones, para entender los tipos de proyectos de inversión y la política de desarrollo específica de cada región, así como el DISA (Diagnóstico Integral de la Situación Actual) derivado del FODA (Fortalezas Oportunidades Debilidades y Amenazas) y establecer las principales necesidades que se presentan en cada caso.

La última consideración, y tal vez la de mayor importancia, es el mercado. Las regiones en donde se aplique esta tecnología deberán encontrarse cercanas o de fácil acceso a zonas agroindustriales puesto que una de las aplicaciones más importantes es la utilización de los lodos digeridos como mejoradores de suelo y para que el proyecto pueda tener una viabilidad comercial es necesario que exista un mercado en donde distribuir la producción.

#### **3.1 Elección del sitio para propuesta de planta de biogás**

Veracruz es el segundo lugar a nivel nacional en superficie sembrada y cosechada tan sólo después de Jalisco y el cuarto lugar en cuanto a valor de la producción agrícola se refiere. Ésto habla de la importancia que tiene la agricultura en el Estado y lo coloca como un excelente mercado potencial.

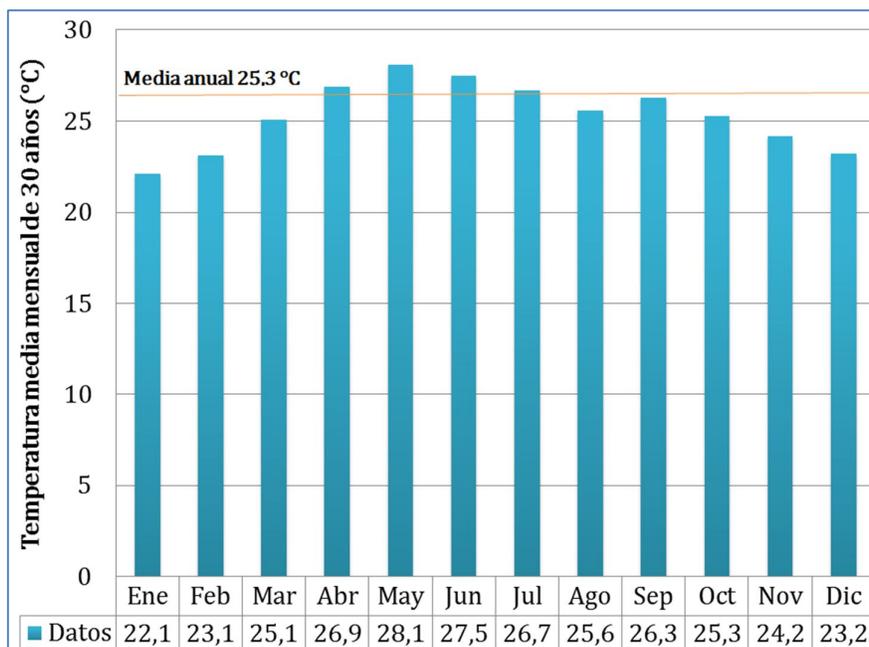
El estado ocupa el primer lugar del país como productor de la caña de azúcar, arroz, chayote, naranja, piña, limón persa, vainilla y hule; el segundo lugar en café, tabaco y papaya; y es un importante productor de maíz, frijol, soya, pepino, sandía, mango, toronja y plátano.

El clima del estado varía de una región a otra, de ahí la gran diversidad de productos; sin embargo, la mayoría del territorio se encuentra en una zona tropical, con climas cálidos y lluvias en verano.

La temperatura media anual del estado es de 25.3°C. Cuenta con tres de los puertos más importantes del país, en los que existe un alto promedio de carga y gran actividad turística de lo que se espera una importante generación de residuos.

El Puerto de Veracruz es un municipio que cumple con todas las características que se han considerado pertinentes para la localización del proyecto como una iniciativa de proyecto de inversión e infraestructura urbana.

El Puerto de Veracruz posee un clima húmedo tropical, con una temperatura media anual de 25.3°C (Figura 3.1), según el Plan Municipal de Desarrollo de Veracruz 2011-2013, y en cuanto a infraestructura, está conectado a todo el país mediante uno de los más importantes sistemas carreteros asociados con la intensa actividad comercial.



**Figura 3.1 Promedio de temperaturas de los últimos años en el Puerto de Veracruz (SMN, 2008)**

Otro aspecto importante es el tipo y la cantidad de residuos que se generan. En general en el Estado de Veracruz se generan en promedio 0.8 kg/hab•día, sin embargo el puerto es la ciudad con mayor concentración poblacional (654 216 habitantes en el municipio de Veracruz y Boca del Río), generando 600 ton diarias en días normales, pero en periodos vacacionales hasta 800 ton, lo que significa una producción media de 1 kg/hab•día. La composición es muy similar al promedio nacional y se puede considerar una fracción del 50% de residuos orgánicos.

Dentro de los ejes rectores del desarrollo derivados del diagnóstico municipal en el Plan Municipal de Desarrollo del Municipio de Veracruz, se contemplan planes como:

- Plan de cuidado al medio ambiente
  - Creación del Consejo de Colaboración Municipal del Medio Ambiente.
  - Reglamentar y dar certidumbre a las opiniones técnicas sobre manifestaciones de impacto ambiental, que presentan empresas e inversionistas.
  - Difundir campañas para establecer una nueva cultura de manejo de basura en las playas, la zona centro de la ciudad, los patios de casas y lotes baldíos.

- Mejorar la atención a quejas sobre la emisión de contaminantes y prestar apoyo para la recolección de ramas y basura.

Las premisas planteadas en el Plan de Desarrollo del Municipio hablan de la disposición política y social que se pretende seguir en el mediano plazo con respecto al medio ambiente y en especial lo concerniente al manejo de los residuos. Sin embargo, a pesar de las buenas intenciones y los objetivos estratégicos a mediano y largo plazo, no existe un programa de inversión a corto plazo, lo que habla de una deficiente política de desarrollo. Lo rescatable, es que según la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos, los municipios pueden otorgar concesiones para complementar y desarrollar planes de manejo integral, así como para promover Proyectos para la Prestación de Servicios PPS en donde se busca la inversión privada, la creación de empresas de consultoría y gestionar de una mejor forma el presupuesto. Ésto fortalecerá la infraestructura pública y brindará un mejor servicio a la población.

Para continuar con la localización de la planta de biogás, se han identificado las principales fuentes de generación de residuos sólidos orgánicos de la región con la finalidad de obtener materia prima con alto grado de pureza, para reducir los costos de separación en planta y planear la capacidad del proceso productivo en las diferentes etapas. El procedimiento que se ha utilizado es similar al que se sigue en el cálculo de los centros de masa, para encontrar el punto, en el cual la distancia total que se tiene a las diversas fuentes de materia prima es mínima.

Las fuentes de generación de residuos que se han considerado son los 7 mercados municipales que existen en el puerto. En la Figura 3.2, obtenida de GoogleEarth™, se puede observar la ubicación de los mercados y la central de abastos, que para fines de cálculo, se han ubicado después en un plano cartesiano mostrado en la Figura 3.3.

La generación diaria de residuos orgánicos se muestra en la Tabla 3.1, en la columna "materia prima" y de ahí se obtuvo el Factor R1.

*Generación diaria de residuos orgánicos proveniente de la fuente i = Pi*

$$\mathbf{Factor\ R1}i = \frac{Pi}{\sum_{i=A}^R Pi} \quad (\text{Meredith, 1999}) \quad (3-1)$$

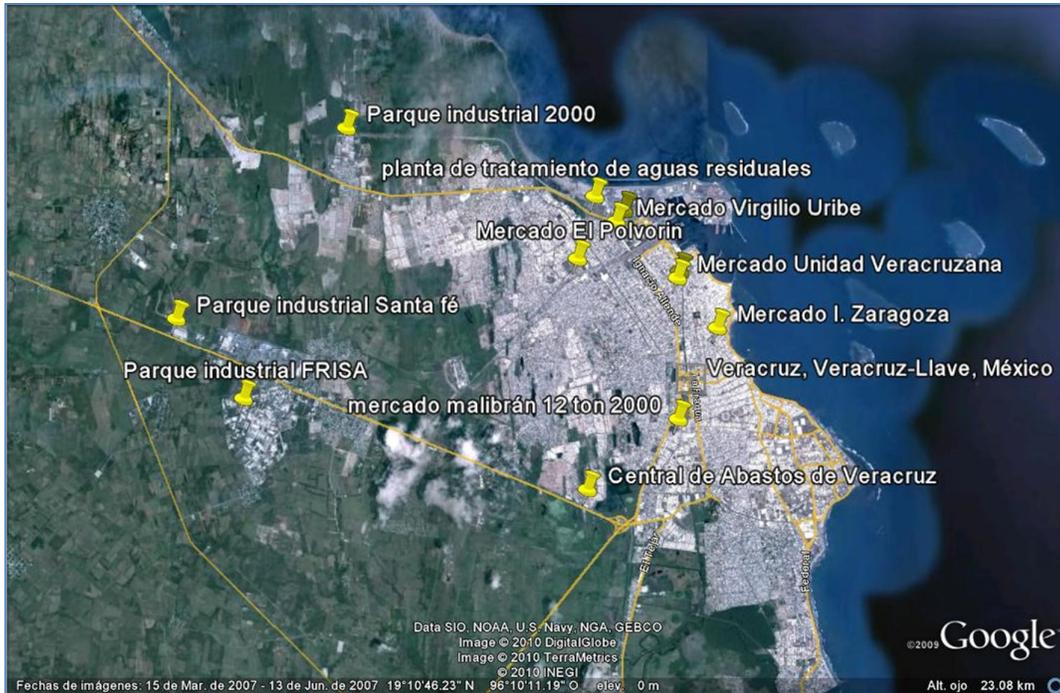
La distancia en línea recta desde la ubicación de las fuentes de materia prima se obtuvo con las coordenadas, para obtener la componente en X y Y, y así calcular la magnitud del vector (Figura 3.3).

*Distancia a la fuente de materia prima i desde la ubicación k = Di*

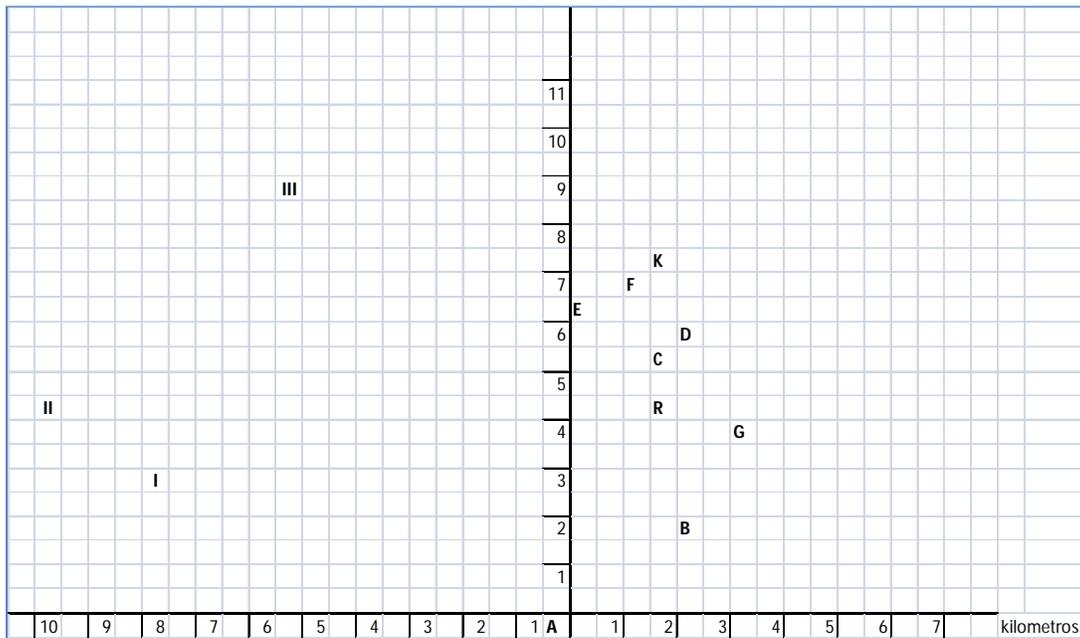
$$D_{ik} = \sqrt{(X_k - X_i)^2 + (Y_k - Y_i)^2} \quad (\text{Muñoz, 2009}) \quad (3-2)$$

**Tabla 3.1 Resultado para elección de lugar para la planta de biogás**

				Coordenadas		Distancia a las posibles ubicaciones			Puntaje total		
	Puntos de interés	Generación	Factor R1	X	Y	I	II	III	I	II	III
A	Central de abastos de Veracruz	40 ton	0.27	0	0	8.2	10.6	10.5	18.0	28.3	27.8
B	Mercado Malibrán	20 ton	0.13	2.25	1.75	10.0	12.3	10.6	44.0	65.1	56.5
C	Mercado Unidad Veracruzana	10 ton	0.07	1.75	5.25	9.8	11.5	8.3	86.0	122.6	87.9
D	Mercado Miguel Hidalgo	8 ton	0.05	2.25	5.75	10.4	12.1	8.5	114.2	160.6	113.5
E	Mercado El polvorín	6 ton	0.04	0.25	6.25	8.7	10.2	6.5	127.3	180.6	115.1
F	Mercado Virgilio Uribe	8 ton	0.05	1.25	6.75	9.8	11.3	7.3	107.7	149.8	96.7
G	Mercado Ignacio Zaragoza	8 ton	0.05	3.25	3.75	11.0	13.0	10.3	120.8	172.8	136.7
H	Mercado Plaza del mar	15 ton	0.10	1.75	7.25	10.5	7.6	7.6	61.3	84.2	54.2
R	RSU	35 ton	0.23	1.75	4.25	9.6	8.7	8.7	24.0	34.9	26.6
	<b>Totales</b>	<b>150 ton</b>				<b>88.3</b>	<b>78.4</b>	<b>78.4</b>	<b>703.3</b>	<b>998.9</b>	<b>715.0</b>
Ubicaciones posibles				Coordenadas		Otros factores importantes a considerar					
				X	Y	Vías acceso	Disponibilidad	Recolección	Mercado	Total	Factor R2
I	Parque industrial Bruno Pagliani			-7.75	2.75	3	3	2	2	10	0.58
II	Parque industrial Santa fé			-9.75	4.25	2	1	1	3	7	0.71
	Parque industrial 2000			-5.75	8.75	1	2	3	1	7	0.71



**Figura 3.2 Imagen Satelital del Puerto de Veracruz con Mercados**

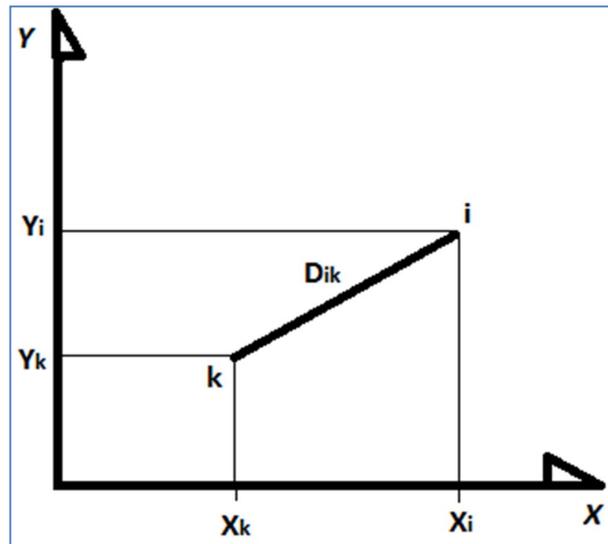


**Figura 3.3 Ubicación de los mercados del puerto en un plano cartesiano**

Para proponer las tres ubicaciones posibles de la planta se tomaron en cuenta varios factores: Las vías de acceso, la disponibilidad del terreno, la cercanía con la ruta de recolección predispuesta y el acceso al posible mercado o las zonas agroindustriales. De este análisis se obtuvieron tres sitios: El parque industrial Bruno Pagliani, El parque

industrial Santa Fé y el parque industrial 2000. Se elaboró una matriz para que, de forma cuantitativa y cualitativa, se evaluarán los factores antes mencionados, (esta matriz se encuentra en la parte inferior de la Tabla 3.1), para esto se asignaron valores de 1, 2 y 3 según una opinión ponderada. Se sumaron los puntos respectivos a cada parque, mismos que servirán para obtener el factor  $R_2$ .

$$R_{2i} = 1 - \frac{\sum_1^4 F_i}{\sum_{III} \sum_1^4 F_i} \quad (\text{Muñoz, 2009}) \quad (3-3)$$



**Figura 3.4 Representación de la distancia como la magnitud de un vector**

Donde:  $F_i$  es la calificación respectiva por cada factor a considerar en la ubicación de la planta. En la fórmula también se encuentra la calificación final por cada ubicación y los puntos totales para las tres alternativas. Al final para que el factor  $R_2$  no pese tanto en la elección de la ubicación óptima, se toma el complemento y es por eso que se resta de la unidad. Entre más pequeño resulte éste cociente, dará una mejor calificación para la alternativa.

En la matriz "puntaje total" ubicada en la parte superior derecha de la Tabla 3.1 es donde se realiza la toma de decisión. Para esto se llevó a cabo el siguiente cálculo:

$$\text{Calificación final}_i = \sum_{III} \frac{D_{ki}}{R_{1k}} \circ R_{2i} \quad (\text{Muñoz, 2009}) \quad (3-4)$$

En la Tabla 3.1 se puede observar que la ubicación elegida es el PARQUE INDUSTRIAL BRUNO PAGLIANI, es decir la opción I debido a que causaría el menor costo y porque concuerda con la estrategia del proyecto. Lo siguiente será la elección del terreno.

Después de examinar algunos terrenos disponibles y verificar sus dimensiones, a través de la herramienta "GoogleEarth"®, el lugar elegido se encuentra ubicado a un costado de la empresa Empacadora del Golfo S.A. de C.V. en la avenida Fraboyanes No 1393 del parque industrial Bruno Pagliani y se observa en las Figuras 3.5 y 3.6.



**Figura 3.5 Ubicación de planta de biogás**



**Figura 3.6 Terreno para la ubicación de la planta de biogás**

### **3.2 Metodología para el diseño de la planta de biogás**

El proyecto que se plantea consiste en la construcción de una planta de tratamiento para una fracción de los residuos orgánicos generados en el puerto de Veracruz, mediante la tecnología de la degradación anaerobia, así como la adquisición/construcción de la infraestructura e instalaciones auxiliares necesarias para la generación de productos viables desde el punto de vista comercial.

La demanda inmediata es de aproximadamente 150 ton/día, así que el proceso se dimensionará con base en esa capacidad. Cuando se tratan los residuos bajo el esquema del sistema anaerobio, convencionalmente se obtienen dos productos principales: Una mezcla nutritiva proveniente de los lodos digeridos, libre de agentes patógenos y/o infecciosos, y biogás compuesto regularmente por  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ , así como también un porcentaje de vapor de agua.

Con respecto al biogás hay varias opciones para comercializarlo o aprovecharlo. Regularmente se utiliza para generar energía eléctrica mediante su combustión en

turbinas o motogeneradores y abastecer la demanda de potencia del sistema. Otra opción es utilizarlo en calderas para generar energía térmica que se usa en diversas fases de la planta; sin embargo, en algunos países desarrollados es muy atractivo comercializar con su potencial.

El modelo que se utilizará en éste proyecto es la comercialización del biogás como un biocombustible para el sector transporte automotriz. Esta aplicación ha tenido mucho éxito en Sudamérica, (tan sólo Argentina y Brasil cuentan con el 30% del mercado mundial) debido a las grandes reservas de Gas Natural (el gas natural se compone en un 90% de CH<sub>4</sub> al igual que la calidad que puede alcanzar el biogás después de algunos procesos) y a las políticas de reducción de emisiones.

Con respecto a los fertilizantes, existen datos muy interesantes. A pesar de la gran oferta en México de fertilizantes químicos, la producción nacional cubre tan sólo el 21% del consumo, y de hecho hay fórmulas que se importan totalmente. De los 21.4 millones de hectáreas que se siembran en México, sólo el 47.7% se fertilizan y el 80% se concentra en 11 estados entre ellos el Estado de Veracruz, donde la agricultura intensiva depende de una importante cantidad de insumos (Ávila, 2001).

Hoy en día existen diferentes presentaciones para los fertilizantes: Sólida, líquida y gaseosa, y la mejor presentación dependerá de las condiciones particulares del suelo, el sistema de producción agrícola utilizado y el tipo de cultivo. Los factores que influyen en la absorción mineral son en general: La textura, el porcentaje de oxígeno o aire, el pH y las interacciones iónicas en el suelo, además de la naturaleza y la fase de desarrollo de la planta. Hay otros factores relacionados con las condiciones climáticas como la temperatura, humedad y luz (FIRA, 2009).

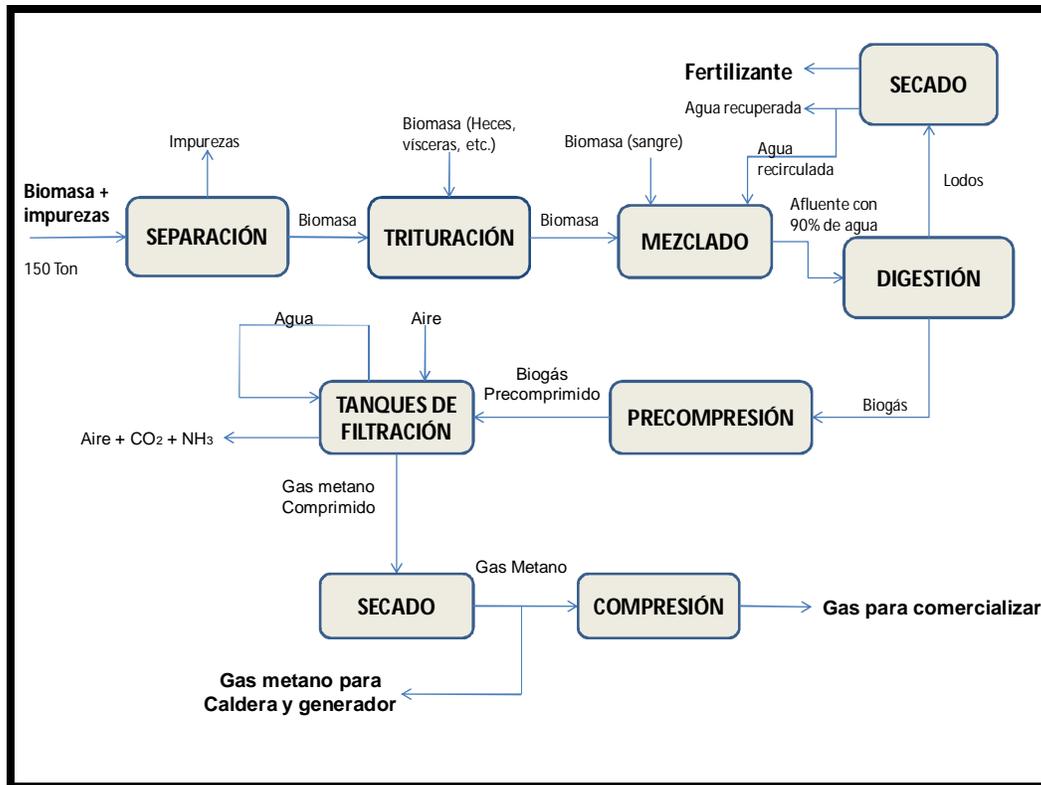
Este proyecto contempla la recuperación de los lodos y su acondicionamiento para producir abono o fertilizante del tipo granular y el aprovechamiento de la humedad contenida para recircularla en el proceso y utilizarla como agua de riego con buenas propiedades nutritivas.

Estas instalaciones contribuirían a disminuir la cantidad de residuos orgánicos que llegan actualmente a disposición final sin costo para el gobierno municipal, además se reducirían considerablemente la emisión de gases de efecto invernadero al quemar el CH<sub>4</sub> del biogás y convertirlo en CO<sub>2</sub>, 21 veces menos nocivo.

### **3.3 Procesos y tecnologías a emplear en la planta de biogás**

En el diagrama de flujo de la Figura 3.7 se muestran los procesos generales que se deben llevar a cabo para la obtención de los productos antes mencionados sin descuidar la operatividad y rentabilidad del proyecto.

El proceso de transformación inicia al entrar al sistema, la biomasa e impurezas (150 Ton de desechos), llegando principalmente en camiones del servicio de limpia municipal. Posteriormente los desechos entran a un proceso de selección y separación para excluir impurezas de los desechos orgánicos. En ésta etapa se podrían obtener cantidades importantes de materiales reciclables y para aprovecharlos es necesario diseñar las fases de acopio, acondicionamientos secundarios y almacenamiento.



**Figura 3.7 Diagrama de proceso propuesto para la planta de biogás**

Ahora que la materia prima se compone en su mayoría de desechos orgánicos, pasa por un proceso de trituración en donde se busca reducir el tamaño de partícula y homogeneizar su simetría para conseguir un eficiente mezclado con agua recirculada para su introducción al proceso de digestión.

El siguiente paso es dejar que las bacterias en la fase de digestión degraden la mezcla durante el tiempo de retención hidráulica para mineralizar los componentes y producir biogás. La idea es alimentar el digestor de manera continua para que no falte sustrato para el proceso de conversión biológica y cuidar los parámetros como temperatura, pH, agitación y presión planteados en el Capítulo 2 para que los cultivos microbianos proliferen de manera adecuada.

Después del tiempo de retención es necesario llevar los lodos digeridos al secado donde se obtendrá la textura y humedad adecuada del fertilizante. El secado puede llevarse a cabo en varias etapas.

Por otro lado, en la digestión se obtendrá biogás que debe ser llevado a una etapa de pre compresión, y almacenamiento previo. Después es necesario retirar del biogás los compuestos como el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{H}_2\text{S}$  que corroen los equipos y dificultan el aprovechamiento del metano, para esto se lleva a cabo un proceso de filtración y secado. En ese momento sería posible la utilización eficiente de una parte del biogás en calderas y generadores para el abasto energético de la planta. Al mismo tiempo, la otra parte del metano es llevado a una etapa de compresión (200 bar) para ser despachado y utilizado como un combustible vehicular, de ahí el nombre de gas natural comprimido.

## CAPÍTULO 4

### EVALUACIÓN Y RESULTADOS

#### 4.1 Pre-factibilidad técnica

##### 4.1.1 Dimensionamiento de los procesos y memoria de cálculo

A continuación se describe el dimensionamiento de los principales equipos y procesos.

##### 4.1.1.1 Selección y separación de inorgánicos

Para dimensionar esta etapa, no fue necesario entrar a detalle en el diseño de cada uno de los componentes que constituyen una banda de selección o incluso una planta de recuperación de materiales completa gracias a que algunos proveedores mexicanos ya comercializan paquetes de bandas de selección, cribas para separación de orgánicos e inorgánicos y prensas para reducir el volumen de los materiales reciclables recuperados.

Sin embargo, para determinar qué modelo o paquete complementaría adecuadamente la planta de biogás se sabe que la capacidad necesaria es de 150 ton/día de residuos orgánicos y si se define el turno en 8 horas laborales efectivas por día, el volumen por hora a manejar se calcula como sigue:

$$\text{Volúmen diario} = \frac{\text{Masa diaria}}{\delta} \times \frac{1 \text{ día}}{X \text{ horas}} \quad (4-1)$$

La densidad aproximada medida en los residuos orgánicos es de  $\delta = 0.8 \text{ ton/m}^3$  (Arvizu, 2010)

$$\text{Volúmen diario} = \frac{150 \frac{\text{ton}}{\text{día}}}{0.8 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}} \times \frac{1 \text{ día}}{8 \text{ horas}} = 187.5 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ día}}{8 \text{ horas}} = 23.5 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}}$$

Tabla 4.1 Plantas de selección de residuos (FLUIDICA, 2011)

Modelo y Capacidad	Descripción
I hasta 10m <sup>3</sup> /h	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tolva de recepción para banda seleccionadora</li> <li>Banda de selección horizontal de 0.7 m de ancho, 1.1 m de alto, 10 m de longitud, con 6 contenedores plásticos</li> </ul>
II hasta 50m <sup>3</sup> /h	<ul style="list-style-type: none"> <li>Banda transportadora inclinada para elevación de residuos 0.7 m de ancho y 10 m de largo</li> <li>Trommel de cernido de 0.7 m de diámetro y 1.4 m de longitud con 5HP, con malla de 3 a 5 cm, transmisión autónoma y salida</li> <li>Banda transportadora horizontal de 1.2 m de ancho, 10 m de longitud y 6 ductos de salida a supersacos, velocidad 8 m/min</li> </ul>
III hasta 100m <sup>3</sup> /h	<ul style="list-style-type: none"> <li>Banda transportadora inclinada para elevación de residuos 0.7 m de ancho y 10 m de largo</li> <li>Trommel de cernido de 0.7 m de diámetro y 1.4 m de longitud con 5HP, con malla de 3 a 5 cm, transmisión autónoma y salida de producto</li> <li>Banda transportadora horizontal de 1.4 m de ancho, 10 m de longitud y 6 ductos de salida a supersacos, velocidad 10 m/min</li> </ul>

El modelo II de planta seleccionadora de residuos sólidos urbanos presentado en la Tabla 4.1, con capacidad para tratar 50 m<sup>3</sup>/hora, supera los 23.5 m<sup>3</sup>/hora que es el equivalente volumétrico de la masa entrante y que se calculó con el modelo (4-1), por lo que este paquete es adecuado. Sin embargo, para corroborar que este modelo cumple cabalmente para transportar el volumen entrante se utilizará el siguiente modelo:

$$Q = \alpha \times v \quad (\text{Miravete y Larrodé, 1996}) \quad (4-2)$$

$\alpha$ : Sección transversal

$v$ : velocidad media de la banda

La velocidad media se traduce de m/min a m/hora utilizando un factor unitario o equivalencia que relacione los minutos con las horas:

$$8 \frac{m}{min} \left( \frac{60 min}{1 hora} \right) = 480 \frac{m}{hora}$$

La sección transversal se calcula como sigue:

$$\alpha = \text{ancho de banda} \times \text{altura talud} \quad (\text{Miraverte y Larrodé}) \quad (4-3)$$

Para que los seleccionadores puedan desempeñar su función eficientemente la altura máxima del talud se establece en 10 cm, que también puede verse como la profundidad a la que tendrían que escarbar para buscar materiales de rechazo. Entonces:

$$\alpha = 1.2 m \times 0.1 m$$

$$\alpha = 0.12 m^2$$

$$Q = 0.12 m^2 \times 480 \frac{m}{h}$$

$$Q = 57.6 \frac{m^3}{h}$$

Entonces, se comprueba que el modelo II es adecuado; de hecho, a pesar de que la sección transversal típica variara un 20% seguiría siendo el modelo más cercano a los requerimientos del proyecto ya que el modelo inmediato con menor capacidad es el Modelo I pero tan sólo permite tratar 10 m<sup>3</sup>/hora lo que no cubre nuestra demanda ni aunque se doblara el horario laboral.

#### 4.1.1.2 Trituración de orgánicos

Para determinar la potencia necesaria para la trituradora se revisaron equipos de la empresa SSIWorld®, especialista en trituración, que tuvieran la capacidad para recibir residuos urbanos orgánicos, que pueda reducir en gran medida el tamaño de partícula y lo volviera homogéneo, que tuviera la capacidad volumétrica necesaria para procesar la totalidad de la biomasa entrante en el tiempo adecuado y que tuviera una alimentación y descarga automatizadas (SSI, 2011).

La potencia que se determinó es de 30 HP y se puede utilizar un modelo M100 DualShear™ por lotes para cubrir la demanda de 200 m<sup>3</sup>/día en 8 horas. Mientras más pequeño sea el tamaño de partícula se obtendrá una mejor degradación.

### 4.1.1.3 Dilución

Antes de comenzar la digestión es muy recomendable diluir la mezcla de residuos para que alcancen un porcentaje de humedad de 90%, o dicho de otro modo la masa seca deberá ser el 10% en la mezcla (Fricke y col, 2005).

Los parámetros que se determinaron para los residuos de acuerdo con lo mostrado en la Tabla 2.6, para la fila de desechos domiciliarios o de cocina, son:

$$\% \text{masa seca (MS)} = 18\%, \% \text{masa volátil (MV)} = 75\%$$

Los modelos matemáticos y cálculos que se muestran en adelante, se realizaron con base en las recomendaciones del manual para el diseño, dimensionamiento y construcción de digestores (Moncayo, 2008), y a menos que se especifique lo contrario debe considerarse ésta fuente.

$$\text{Masa seca entrante} = (\text{Masa total}) (MS) \quad (4-4)$$

$$\text{Masa seca entrante} = \left(150 \frac{\text{ton}}{\text{día}}\right) (18\%) = 27 \frac{\text{ton}}{\text{día}} = 33.75 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$\text{Masa volátil entrante} = \text{Masa Seca entrante} \cdot MV \quad (4-5)$$

$$\text{Masa volátil entrante} = \left(27 \frac{\text{ton}}{\text{día}}\right) (75\%) = 20.25 \frac{\text{ton}}{\text{día}} = 25.31 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

El volumen total que tendrá el afluente se calcula en función del porcentaje de dilución recomendado de la siguiente manera:

$$\text{Volumen de alimentación} = \frac{\text{Masa Seca entrante}}{1 - \% \text{Dilución}} \quad (4-6)$$

$$\text{Volumen de alimentación} = \frac{33.75 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{1 - 90\%} = 337.5 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Por lo tanto, el agua necesaria para la dilución se calcula:

$$\text{Agua dilución} = \text{influyente} (\% \text{dilución}) - (\text{Volumen diario} - \text{Masa seca}) \quad (4-7)$$

$$\text{Agua para dilución} = 337.5 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} (90\%) - \left(187.5 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} - 33.75 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right) = 150 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Para este trabajo se propone que el tanque de almacenamiento, conserve tres días de producción para tener dos días de seguridad, que es el tiempo en el que puede faltar la materia prima, debido a que la recolección se realiza cada tercer día y previendo una contingencia de un día. Es por eso que el dimensionamiento se realiza de la siguiente manera:

$$\text{Vol tanque de alimentación} = \text{influyente} \cdot \text{días de almacenamiento} \quad (4-8)$$

$$\text{Vol tanque de alimentación} = \left(337.5 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right) \times 3 \text{ días} = 1012.5 \text{ m}^3$$

La forma de tanque que usualmente se utiliza es la cilíndrica y lo que se busca a continuación es reducir el material que se utilizará por lo que se realiza el siguiente procedimiento, en el que se minimiza el área, dado un volumen definido, para encontrar el diámetro y altura que cumplen con esta restricción:

$$\text{Volumen de tanque cilíndrico} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h = \frac{K}{n} \quad (4-9)$$

Donde:

D= Diámetro  
h= Altura  
n= Número de tanques  
K= Volumen de tanque definido

$$\rightarrow \text{Restricción: } h = \frac{4K}{\pi n D^2} \quad (4-10)$$

Además consideraremos sólo un tanque (n=1).

Función objetivo: Área del tanque.

$$\text{Área tanque} = 2(\text{Área base}) + \text{Área lateral}$$

$$\text{Área tanque} = 2\left(\frac{\pi D^2}{4}\right) + \pi D h$$

$$\text{Área tanque} = \frac{\pi D^2}{2} + \pi D h$$

Sustituyendo la restricción:

$$\text{Área tanque} = \frac{\pi D^2}{2} + \frac{4K}{D}$$

Derivando e igualando a cero:

$$\frac{\partial A}{\partial D} = \frac{\pi}{2} (2D) - \frac{4K}{D^2}$$

$$\frac{\partial A}{\partial D} = \pi D - \frac{4K}{D^2}$$

Igualando a cero y multiplicando por D<sup>2</sup>

$$\pi D^3 - 4K = 0$$

Despejando D:

$$D = \sqrt[3]{\frac{4K}{\pi}} \quad (4-11)$$

Por lo tanto sustituyendo el volumen del tanque en la ecuación de la altura (4-10) y diámetro (4-11) se tiene:

$$\text{Diámetro del tanque} = \sqrt[3]{\frac{4(1012.5\text{m}^3)}{\pi}} = 10.88 \text{ m}$$

$$\text{Altura del tanque} = \left(\frac{4(1012.5\text{m}^3)}{\pi}\right)\left(\frac{1}{(10.89)^2}\right) = 10.89 \text{ m}$$

Por consideraciones prácticas de construcción y para que los gases que se están liberando puedan captarse y lograr presión, se dejará un 30% más de volumen en el tanque, por lo que las dimensiones de seguridad son:

$$\text{Volumen de seguridad} = 1316.25 \text{ m}^3$$

Por otro lado, los tanques **nunca** se construyen a más de 5 m de altura por lo que el modelo teórico que obtuvimos para minimizar el material de construcción no podrá ser tomado en cuenta y una nueva restricción para la función objetivo es:

$$\text{altura} \leq 5 \text{ m}$$

Si la altura y el volumen están definidos lo único que podemos variar en la ecuación es el diámetro y el número de tanques. Entonces calcularemos el diámetro con la siguiente ecuación:

$$D = \sqrt{\frac{4Vol_{seguridad}}{\pi h}} = \sqrt{\frac{4(136.25\text{m}^3)}{\pi(5\text{m})}} = 18.31 \text{ m}$$

#### 4.1.1.4 Parámetros de digestión

Éste es el proceso central de la planta y en donde se ven involucradas más variables. Algunos de los parámetros que se consideran son los siguientes:

*Proceso Termofílico* = Temperatura 55°C (Hartmann y Ahring, 2006)

*Tiempo de Retención Hidráulica* = 15 días.

*Carga Orgánica Volumétrica (COV)* = 2.75 kgMV/m<sup>3</sup> (Hartmann y Ahring, 2006)

El procedimiento para dimensionar los tanques cilíndricos de esta etapa se explican a continuación:

$$\text{Demanda de volumen en el digestor} = \text{influyente diario} \times \text{TRH} \quad (4-12)$$

$$\text{Demanda de volumen en el digestor} = 337.5 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \times 15 \text{ día} = 5,062.5 \text{ m}^3$$

La carga orgánica volumétrica es un parámetro de carga que se obtiene experimentalmente. Brinda información acerca de la cantidad de masa orgánica que puede entrar a un volumen determinado de digestión por unidad de tiempo. Nos ayudará a fijar el volumen real que debe tener el digestor:

$$COV = \frac{\text{Masa seca entrante}}{\text{Volumen de digestión}} \quad (4-13)$$

Lo que se hace es despejar el volumen del digestor de esta relación y se calcula.

$$\text{Volumen de digestión} = \frac{\text{Masa Seca entrante}}{COV} \quad (4-14)$$

$$\text{Volumen de digestión} = \frac{20,250 \frac{\text{kg MV}}{\text{día}}}{2.75 \frac{\text{kg MV}}{\text{día} \cdot \text{m}^3}} = 7,363.64 \text{ m}^3$$

Y considerando nuevamente un factor de seguridad de 30%

$$\text{Volumen aumentado de digestión} = 9,572.73 \text{ m}^3$$

Nuevamente tenemos una restricción de altura de  $h \leq 5\text{m}$  y para esta etapa usaremos dos reactores con el fin de minimizar material y mantener funcionando la planta a pesar de que se deba realizar mantenimiento en alguna de las líneas de producción.

Entonces, si  $n=2$  y  $h=5\text{m}$ , se utilizará el siguiente modelo para calcular el diámetro:

$$D = \sqrt{\frac{4Vol_{\text{ajustado de dig}}}{\pi h n}} = \sqrt{\frac{4(9,572.73 \text{ m}^3)}{\pi (5\text{m})(2)}} = 34.91 \text{ m}$$

#### 4.1.1.5 Generación y adecuación del biogás

Debido al tipo de sustrato que se va a emplear y a los parámetros definidos en el proceso de digestión se pueden utilizar los siguientes factores para caracterizar la producción y definir las características del biogás (Tabla 2.6):

$$\text{Factor producción de biogás} = 400 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{ton MV}}$$

Composición de biogás:

Metano ( $\text{CH}_4$ )	60%
Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )	30%
Ácido Sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ )	5%
Vapor de agua	5%

La capacidad calorífica del biogás con estas condiciones será aproximadamente de: 5,400.00 Kcal/m<sup>3</sup>

$$\text{Producción biogás} = \text{Factor producción de biogás} \times \text{MV entrante} \quad (4-15)$$

$$\text{Producción biogás} = \left(400 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{ton MV}}\right) \left(20.25 \frac{\text{ton MV}}{\text{día}}\right) = 8,100 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \text{ biogás}$$

$$\text{Producción de biogás} = 337.54 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ biogás}$$

Para utilizar el biogás en equipos convencionales sin la necesidad de realizar adecuaciones es necesario realizar un proceso de filtración o purificación, en donde el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{H}_2\text{S}$  son removidos para dejar libre al metano que es la base del biocombustible.

Después de la purificación la producción de metano sería de:

$$\text{Producción } CH_4 = \text{Producción biogás} \times \eta_{\text{purificador}} \times \%CH_4 \quad (4-16)$$

Donde:

$$\eta_{\text{purificador}} = \text{eficiencia del purificador}$$

$$\%CH_4 = \text{porcentaje del metano contenido en el biogás}$$

El sistema de purificación que se utilizará es el modelo RIMU de la empresa GreenLane® del grupo internacional Flotech, que a través de tanques scrubber alcanzan eficiencias de más de 90%, en la purificación de metano contenido en biogás.

$$\text{Producción } CH_4 = 8,100 \frac{m^3}{\text{día}} \text{ biogás} \times 90\% \times 60\% = 4,374 \frac{m^3 \text{ metano}}{\text{día}}$$

$$\text{Producción } CH_4 = 182.25 \frac{m^3 CH_4}{\text{hora}}$$

Para este proyecto se han definido tres usos del biogás con la calidad de 90% (contenido de metano): Alimentación de una caldera para la calefacción del sistema de digestión, arranque y operación de un motogenerador para abasto eléctrico de la planta y su uso como GMCV (Gas Metano Comprimido Vehicular) en automotores de la planta, los cuales se explican con más detalle a continuación.

#### 4.1.1.6 Sistema de calefacción

Para este proceso es necesario obtener la energía y potencia requeridas para mantener la biomasa dentro del proceso de digestión en una temperatura media de 55°C, el tipo de aislante térmico que se utilizará para tener las menores pérdidas energéticas a través de las paredes del reactor y la caldera o generador de vapor necesario para entregar la energía térmica al proceso.

En la sección 3.1 de este trabajo, se revisó la temperatura media anual del Puerto de Veracruz y es el valor al que se encuentra la biomasa al inicio del proceso.

$$Q_a = m_a \times C_{pa} \times \Delta T \quad (4-17)$$

Donde:

$Q_a$ =Energía necesaria para calentar el influente

$m_a$ =masa total del influente

$C_{pa}$ =capacidad calorífica del influente

$\Delta T$ =diferencia entre la temperatura deseada y la de entrada

$$Q_a = m_a \times C_p \times \Delta T = 330,750.00 \frac{kg}{\text{día}} \times 4.186 \frac{kJ}{kgK} \times (55 - 25.3)K = 41.12 \frac{GJ}{\text{día}}$$

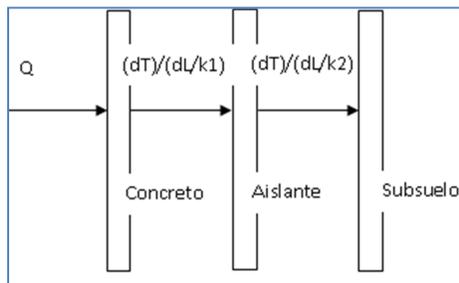
$$Q_a = 475.93 \text{ kW}$$

El siguiente paso es modelar la transferencia de energía a través de las paredes del sistema de digestión, después de seleccionar el aislante térmico, para obtener la otra parte de la potencia necesaria en el sistema de calefacción. En la Tabla 4.2 se muestran algunas opciones de aislamiento con su respectiva conductividad térmica.

**Tabla 4.2 Aislantes y valores típicos de conductividad térmica (k)  
(Incropera y De Witt, 1999)**

Material	Conductividad Térmica $\frac{W}{mk}$
Aire	0.01
Corcho	0.04-0.30
Fibra de vidrio	0.03-0.07
Madera	0.13
Poliestireno expandido	0.025-0.045
Poliuretano	0.018-0.025
Hormigón	0.9

La transferencia de energía a través de una pared que separa dos medio sólidos se puede modelar como se describe en la Figura 4.1.



**Figura 4.1 Modelo de aislamiento térmico de digestor  
(Incropera y De Witt, 1999)**

$$q_b'' = k \frac{dT}{dL} \quad (4-18)$$

$q_b$  = calor por conducción

$k$  = coeficiente de conductividad térmica

$dT$  = diferencia de temperaturas

$dL$  = longitud entre los puntos de interés o espesor del material aislante

En el modelo de construcción que se utilizará, la conducción de energía se lleva a cabo a través de tres sólidos principales: Concreto para la geometría del digestor (hormigón), una capa aislante (espuma de poliuretano) y la capa de subsuelo en el que se enterrará el digestor. El modelo para encontrar la pérdida de energía a través de los tres materiales es:

$$q_b'' = \text{pérdidas de calor } \frac{P}{\text{área}} = \frac{T_d - T_\infty}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2}} = \frac{(55 - 25.3)K}{\frac{0.4m}{0.9 \frac{W}{mK}} + \frac{0.15m}{0.02 \frac{W}{mK}}} = 3.74 \frac{W}{m^2}$$

$$\text{Área de contacto } \frac{P}{\text{digestor}} = \pi \times D \times h + \frac{\pi D^2}{4}$$

$$\text{Área de contacto } \frac{P}{\text{digestor}} = 2,462.94 \text{ m}^2$$

$$\frac{\text{Pérdidas calor}}{\text{digestor}} = q_a'' \times \text{Área de contacto}^p / \text{digestor} = q_a / \text{dig} \quad (4-19)$$

$$\frac{q_a}{\text{digestor}} = 9,207.60 \text{ W}$$

Entonces la demanda de energía térmica debido al flujo a través de las paredes de los digestores es de:

$$Q_b = q_a / \text{digestor} \times \text{No. de digestores} \quad (4-20)$$

$$Q_b = 9,207.60 \frac{\text{W}}{\text{digestor}} \times 2 \text{ digestores}$$

$$Q_b = 18.42 \text{ kW} = 1.59 \frac{\text{GJ}}{\text{dia}}$$

La potencia total requerida por la caldera está dada por el total de la demanda térmica  $Q_a + Q_b$ .

$$Q_t = 494.34 \text{ kW}$$

Según la ficha técnica de una caldera de agua caliente en circuito cerrado, la capacidad de salida de un modelo de 50 C.C. (Caballos caldera) es de 495.5 kW lo que sería suficiente para satisfacer nuestras necesidades energéticas, sin embargo, en los casos en que la temperatura ambiente sea demasiado baja este equipo puede no entregar la energía suficiente y debido a que el proceso trabaja con bacterias termofílicas (muy sensibles a cambios de temperatura) la caldera recomendada será la de 60 C.C. que entrega una potencia de hasta 588.6 kW.

Una de las características deseables en estos equipos es su capacidad para trabajar con gas natural para aprovechar el biogás producido en planta.

$$\text{Consumo nominal de la caldera} = 70.14 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \text{ biogás}$$

$$\text{Consumo real de la caldera} = \frac{\text{Consumo nominal}}{\eta} \times \frac{\text{horas}}{\text{dia}} \quad (4-21)$$

$$\eta \text{ eficiencia} = 85\%$$

$$\text{Consumo real caldera} = \frac{70.14 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}}}{0.85} \times 24 \frac{\text{horas}}{\text{dia}} = 1,980.42 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

#### 4.1.1.7 Sistema de generación de energía

Otro de los usos más comunes del metano es la generación de energía eléctrica. Después de la remoción del ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y el  $\text{CO}_2$  se obtiene un producto que puede ser utilizado en motores de combustión interna, diseñados para otro tipo de combustibles con pequeñas adecuaciones o fabricados especialmente para metano, por lo que puede alimentarse un motogenerador. Para dimensionar el equipo es necesario conocer la demanda de potencia eléctrica en la planta.

La Tabla 4.3 muestra un recuento de las potencias que solicitan algunos de los equipos de los que ya se hablaron y otros que se detallarán más adelante.

**Tabla 4.3 Requerimientos energéticos de equipos necesarios para la planta**

Equipo	Potencia	Ciclo de trabajo[h/día]	Consumo eléctrico [kWh/día]
Trituradora (SSI, 2011)	150.0	8	240.00
Tornillo sin fin (DIM, 2010)	30.0	24	720.00
Banda transportadora	7.4	8	59.20
Trommel (FLUIDICA, 2011)	3.7	8	29.60
Secado (Lothar, 1985)	30.0	10	300.00
Estación compresión (ASPRO, 2010)	150.0	8	1200.00
Potencia simultánea	<b>371.19 kW</b>		<b>TOTAL: 3,508.80</b>

Otro de los factores que se debe considerar es el poder calorífico del metano resultante para saber cuánta energía es capaz de transmitir en combustión.

$$\text{Poder calorífico metano} = \text{Poder calorífico metano} \times \% \frac{\text{metano}}{\text{biogás}} \quad (4-22)$$

Se toma en cuenta que el metano contenido en el biogás después de la purificación tiene un 90% de pureza, por seguridad.

$$PC_{CH_4} = PC_m \times \% \text{Metano} = 9,000 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \times 90\% = 8,100 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3}$$

En la Tabla 4.4 se observa la potencia eléctrica que suministrará el equipo de generación en la columna 3 y en la última columna se ve la potencia que se debe entregar a través de la combustión del metano. Estas consideraciones ya han tomado en cuenta la eficiencia del equipo, y es posible corroborar cómo la energía que entrega es alrededor del 35% de lo que se le debe suministrar a través del combustible.

**Tabla 4.4 Módulos de cogeneración con motor PASCH a biogás (Moncayo, 2008)**

Modelo	Motor	Potencia Eléctrica kW	Potencia térmica kW	Combustible necesario kW
HPC 150 B	E2876-LE 302	150	175	389
HCP 200 B	E2876-LE 302	190	225	493
HCP 250 B	E2848-LE 322	252	301	657
HCP 400 B	E2842-LE 322	404	526	1,072

La cantidad de metano que se consumirá se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Gasto en generación}_{\text{metano}} = \frac{\text{Potencia}_{\text{necesaria}}}{\text{Poder Calorífico del metano}} \quad (4-23)$$

Si la potencia eléctrica necesaria para la planta es de aproximadamente 400 kW, proporcionada por el modelo HCP 400 B con el motor MAN E2842-LE322 entonces la demanda energética en combustible que necesita es de 1,072 kW.

$$\text{Gasto en generación}_{\text{metano}} = \frac{1,072 \text{ kW} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{kW}} \right) \left( \frac{3600\text{s}}{1\text{hora}} \right)}{8,100 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \left( \frac{4.186 \text{ kJ}}{1 \text{ kcal}} \right)} = 113.82 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}}$$

Como se esperaba, el consumo de metano por este equipo es excesivo por la baja eficiencia de producción de energía eléctrica. Sin embargo, puede ser acondicionado para aprovechar la potencia térmica que se genera, en este caso, la eficiencia ronda el 50% y la eficiencia global del ciclo se incrementa considerablemente. Si no existiera la posibilidad de utilizar cogeneración, entre el motogenerador y la caldera agotarían el metano disponible, teniendo que desechar la posibilidad de acondicionarlo para su utilización como combustible vehicular, afortunadamente la potencia térmica proporcionada por el sistema de cogeneración es suficiente para la calefacción o mantenimiento de la temperatura del sistema de digestión y **es posible desechar el uso de la caldera.**

#### 4.1.1.8 Utilización del biogás como combustible vehicular

La intención es aprovechar las ventajas que posee el metano comprimido en comparación con la gasolina como combustible vehicular.

Para introducir el gas metano comprimido en vehículos, es necesario dimensionar los siguientes procesos que constituyen la estación de servicio.

- a. Compresión: Los compresores se dimensionan con dos parámetros, el caudal a comprimir y las etapas de compresión, que están relacionadas directamente con la presión de aspiración. La cantidad de gas a comprimir será el remanente de la cantidad producida y la utilizada en el sistema de cogeneración.

$$\text{Caudal metano a comprimir} = \text{Producción total} - \text{Gasto en cogeneración} \quad (4-24)$$

$$\text{Caudal a comprimir} = 182.25 \frac{\text{m}^3 \text{ metano}}{\text{hora}} - 113.82 \frac{\text{m}^3 \text{ metano}}{\text{hora}} = 68.43 \frac{\text{m}^3}{\text{hora}}$$

La presión de aspiración es equiparada con la presión de salida del sistema de purificación. Un compresor para gas natural vehicular funciona en varias etapas para lograr los 250 bar necesarios en el sistema de conversión del automóvil. Entre menor sea la presión de aspiración del gas mayor será el número de etapas del equipo y mayor será el consumo eléctrico y la inversión inicial.

En la Tabla 4.5 se muestran los consumos eléctricos y las dimensiones de la serie 115 (por la carrera de 115 mm) de compresión de la marca Aspro®, con fábricas en Argentina y Brasil, pero con representantes en México.

En este proyecto la presión máxima aproximada de aspiración que se puede esperar, debido a que el almacenamiento se realizará a través de geomembrana, es de 15 bar, por lo que un equipo de 3 etapas convencional es la mejor opción, pues tendría los consumos más bajos y la inversión inicial adecuada, además de que cumple con el caudal necesario ya que ésta serie maneja caudales de 60-1200 m<sup>3</sup>/hora.

**Tabla 4.5 Características técnicas de equipos de compresión para gas natural  
(ASPRO, 2010)**

<b>Modelo</b>	<b>115-2-30</b>	<b>115-3-12</b>	<b>115-3-19</b>	<b>115-4</b>	<b>115-4R</b>	<b>115-4RR</b>	<b>115-5-3-12</b>	<b>115-5-4R</b>
Número de etapas	2	3	3	4	4	4	4	5
Presión máxima de aspiración[bar]	45	14	19	8	6	3	3.25	1.1
Presión mínima de aspiración	19	7	12	4	2	1.4	1.75	0.2
Presión de descarga	250							
Carrera [mm]	115							
Potencia del motor principal [kW]	90-160	110-160					132-160	
Potencia del pre-compresor [kW]	No necesita						55	
Potencia aero-enfriador	11						5.5-11	
Tensión-frecuencia	380-440 VCA / 50-60 Hz							
Velocidad	800-1000 rpm							
Peso	Aproximadamente 4, 600 kg						Aprox. 8, 000 kg	
En cualquiera de estos modelos puede adaptarse una cabina acústica								

- b. Almacenamiento. La siguiente operación en la estación de servicio del gas es el almacenamiento. Los tanques son de acero de alta resistencia y se comercializan en módulos. Cada tanque tiene una capacidad de 125 L. y se disponen en paquetes de 10, sin embargo pueden ser adecuados a las características que se requieran en planta. Los tanques adecuados para esta operación se pueden ver en la Figura 4.2.



**Figura 4.2 Módulos de almacenamiento de gas natural (ASPRO, 2010)**

Para conocer el número de tanques de almacenamiento se tiene que calcular el volumen que tendría un día de producción manteniendo la presión necesaria.

El modelo que se utilizará para calcular el volumen resultante después de la compresión a 250 bar es el siguiente:

$$\mathbf{Volumen}_{comprimido} = \frac{nTR}{P_{salida}} \quad (\text{Kauzmann, 1970}) \quad (4-25)$$

$n$  = No. total de moles del gas a comprimir

$T$  = Temperatura de la compresión

$R$  = Constante universal de los gases ( $8.314472 \frac{Pa}{mol K}$ )

$P_{salida}$  = Presión de compresión

Para calcular el número total de moléculas de metano que se tendrían en el metano purificado se seguirán los siguientes cálculos:

$$\mathbf{n} = \frac{m_{metano\ producido}}{día} \times \frac{1}{m_{molar\ metano}} \quad (\text{Kauzmann, 1970}) \quad (4-26)$$

$$\mathbf{m}_{molar\ metano} = m_{carbono} + 4m_{hidrógeno} \quad (4-27)$$

$$\mathbf{m}_{molar\ metano} = 0.016 \frac{kg}{mol}$$

$$\mathbf{m}_{metano\ producida} = V_{producido} \times \delta_{metano} \quad (4-28)$$

$$\mathbf{m}_{metano\ producida} = 1,642.35 \frac{m^3}{día} \times 0.717 \frac{kg}{m^3}$$

$$\mathbf{m}_{metano\ producida} = 1,177.57 \frac{kg}{día}$$

Entonces el número de moles es:

$$\mathbf{n} = \frac{1,177.57 \frac{kg}{día}}{0.016 \frac{kg}{mol}}$$

$$\mathbf{n} = 73,597.8 \text{ moles}$$

Para utilizar la ecuación (4-25) se toma una temperatura de 25.3°C (Figura 3.1) correspondiente a la temperatura media anual del Puerto de Veracruz.

$$\mathbf{Volumen}_{comprimido} = \frac{73,597.8 \text{ mol}(25 + 273.15)K \times 8.314 \frac{Pam^3}{mol^{\circ}K}}{250bar \frac{100,000 Pa}{1bar}}$$

$$\mathbf{Volumen}_{comprimido} = 7.3 \frac{m^3}{día} = 7,297.86 \frac{L}{día}$$

Para conocer el número de módulos que se necesitarían se realiza la siguiente operación:

$$\text{No. de módulos de compresión} = \frac{\text{Volumen}_{\text{comprimido}}}{\text{Capacidad}_{\text{módulos}}} \quad (4-29)$$

$$\text{No. de módulos de compresión} = \frac{7,297.86 \frac{\text{L}}{\text{día}}}{1,250\text{L}}$$

$$\text{No de módulos de compresión} = 5.83 \text{ módulos} \approx 6 \text{ módulos}$$

Entonces se necesitan 6 módulos de 10 tanques para almacenar la producción de un día.

- c. Surtidores. El siguiente sistema de la estación de servicio que hay que seleccionar es el módulo surtidor de gas natural comprimido (GNC) que se encarga de abastecer directamente a los automóviles con GNC como los módulos convencionales de gasolina.

Un surtidor como el de la Figura 4.3 puede abastecer un caudal de  $10\text{Nm}^3/\text{min}$  por lo que uno es suficiente para abastecer el metano en un turno de 10 horas. Puede atender dos automóviles simultáneamente y el tiempo estimado de carga es de:

$$\text{Tiempo de servicio} = \frac{\text{Capacidad del tanque vehicular}}{\text{Caudal}} \quad (\text{De la Fuente y Pino, 2000}) \quad (4-30)$$

$$\text{Tiempo de servicio} = \frac{20 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}}{10 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}} = 2 \text{ min}$$



Figura 4.3 Surtidor de gas natural  
(ASPRO, 2010)

#### 4.1.1.9 Uso de lodos digeridos como mejoradores de suelo

De realizar un balance de masa, la biomasa y el agua que entran al tratamiento deben representar la misma materia que los lodos efluentes y la masa convertida en biogás.

También se puede definir la mezcla efluente en términos de la masa seca suspendida para lo cual se utiliza el siguiente parámetro:

$$\mathbf{Lodos_{base\ seca} = masa\ seca[ton] - 75\% \times masa\ volátil[ton]} \quad (4-31)$$

$$\mathbf{Lodos_{base\ seca} = 27ton - (0.75)20.25\ ton}$$

$$\mathbf{Lodos_{base\ seca} = 11.81\ ton}$$

Lo que se planteó en la ecuación anterior es que el 75% de la masa volátil se ha transformado en biogás al final del tiempo de retención.

Ahora se define el efluente en términos porcentuales:

$$\%sólidos = \frac{\mathbf{Lodos_{base\ seca}}}{\mathbf{Masa\ total\ del\ efluente}} \quad (4-32)$$

$$\%sólidos = \frac{\mathbf{11.81ton}}{\mathbf{masa\ influente - masa\ degradada}}$$

$$\%sólidos = \frac{\mathbf{11.81ton}}{\mathbf{330.75ton - 20.75 * 75\%ton}}$$

$$\%sólidos = \frac{\mathbf{11.81\ ton}}{\mathbf{315.56ton}} = \mathbf{3.74\%}$$

$$\%agua = \mathbf{100 - \%sólidos}$$

$$\%agua = \mathbf{96.26\%}$$

Para estimar la densidad de los lodos se utiliza la siguiente ecuación (Gray, 2005):

$$\mathbf{\varphi_{lodos} = \frac{100}{\frac{\%sólidos}{\varphi_{sólidos}} + \frac{\%agua}{1}}} \quad (4-33)$$

La densidad estimada para los lodos activados en base seca es de 1.35 ton/m<sup>3</sup> (Ramalho, 1996) entonces:

$$\mathbf{\varphi_{lodos} = \frac{100}{\frac{3.74}{1.35} + \frac{96.26}{1}}}$$

$$\mathbf{\varphi_{lodos} = 1.009 \frac{ton}{m^3}}$$

Ahora se estimará el volumen que ocuparían los lodos:

$$\mathbf{Volumen\ lodos_{base\ húmeda} = \frac{masa\ del\ efluente}{\varphi_{lodos}}} \quad (4-34)$$

$$\text{Volumen lodos}_{base\ húmeda} = \frac{315.56\text{ton}}{1.009 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}}$$

$$\text{Volumen lodos}_{base\ húmeda} = 312.5 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen lodos}_{base\ seca} = \frac{\text{Masa del efluente}_{sólidos}}{\varphi_{sólidos}}$$

$$\text{Volumen lodos}_{base\ seca} = \frac{11.81 \text{ ton}}{1.35 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}}$$

$$\text{Volumen lodos}_{base\ seca} = 8.75 \text{ m}^3$$

A continuación se dimensionará el espesador de lodos. Primero se debe escoger una tasa de aplicación y aunque se podría generar una a través de una prueba de columnas, para los alcances del presente trabajo es posible basarnos en parámetros empíricos. Lothar (1985) propone una tasa de aplicación de 60 kg/m<sup>2</sup>/d para lodos primarios en combinación con excesos de lodos activados.

Entonces el área necesaria para el sedimentador estará dada por:

$$\text{Área del espesador} = \frac{\text{Lodos}_{base\ seca}}{\text{Tasa de aplicación}} \quad (\text{Lothar, 1985}) \quad (4-35)$$

$$\text{Área del espesador} = \frac{11,810 \frac{\text{kg}}{\text{d}}}{60 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2(\text{d})}} = 196.83 \text{ m}^2$$

Por criterios de operación y mantenimiento es recomendable construir al menos dos equipos, en realidad la razón principal es hacer mantenimiento sin la necesidad de detener por completo la operación. Por lo que el diámetro será:

$$\text{Diámetro de espesador} = \sqrt{\frac{4(\text{Área})}{\pi}} \quad (4-36)$$

$$\text{Diámetro de espesador} = \sqrt{\frac{4(196.83 \text{ m}^2)}{\pi}} = 15.83 \text{ m}$$

La compactación de lodos que se espera se basa en los datos de la Tabla 4.6, que contiene información para diversas fuentes de lodos. En este caso se tendría una suspensión que ha salido de un proceso anaerobio y se considera de tratamiento secundario por lo que es posible alcanzar un 9% de concentración de sólidos a la salida de esta etapa.

**Tabla 4.6 Concentraciones máximas permisibles en espesadores de diferentes tipos de lodos (Lothar, 1985)**

Tipo de Lodo	Máxima concentración de sólidos posible sin el uso de acondicionadores
Primario con lodo industrial pesado	10-30%
Primario:	
a) más de 65% volátiles	5-7%
b) menos de 65% volátiles	7-12%
Primario + exceso de secundario:	
a) con índice > 100ml/g	4-6%
b) con índice < 100ml/g	6-11%
Aireación extendida	3-5%
Primario digerido anaeróbicamente	8-14%
Lodo activado digerido anaeróbicamente	6-9%
Lodo activado con tratamiento térmico	10-15%

La masa de los lodos compactados será de:

$$\mathbf{Lodos\ espesados}_{masa} = \frac{\mathbf{Lodos\ base\ seca}}{\% \mathbf{sólidos\ deseado}} \quad (\text{Lothar, 1985}) \quad (4-37)$$

$$\mathbf{Lodos\ Espesados}_{masa} = \frac{11.81 \frac{\mathbf{ton}}{\mathbf{d}}}{9\%} = 131.25 \frac{\mathbf{ton}}{\mathbf{d}}$$

La densidad de estos lodos, con base en la ecuación (4-33):

$$\mathbf{\varphi}_{lodos} = \frac{100}{\frac{9\%}{1.35} + \frac{91\%}{1}} = 1.02 \frac{\mathbf{ton}}{\mathbf{m}^3}$$

El volumen de los lodos espesados será de:

$$\mathbf{Volumen\ lodos\ compactados} = \frac{\mathbf{Lodos\ Espesados}_{masa}}{\mathbf{\varphi}_{lodos}} \quad (\text{Lothar, 1985}) \quad (4-38)$$

$$\mathbf{Volumen\ lodos\ compactados} = \frac{131.25 \frac{\mathbf{ton}}{\mathbf{d}}}{1.02 \frac{\mathbf{ton}}{\mathbf{m}^3}} = 128.19 \frac{\mathbf{m}^3}{\mathbf{d}}$$

El volumen sobrenadante estará dado por la ecuación (4-39) del manual de Lothar (1985):

$$\mathbf{Volumen\ sobrenadante} = \mathbf{Lodos}_{base\ húmeda} - \mathbf{Volumen\ lodos\ compactados} \quad (4-39)$$

$$\mathbf{Volumen\ del\ sobrenadante} = 327.8 - 128.19 = 199.61 \frac{\mathbf{m}^3}{\mathbf{d}}$$

Concentración promedio de la zona de lodo (considerada el 75% del lodo compactado)

$$\text{Concentración media en la zona de compactación} = 9\% \times 0.75 = 6.75\%$$

Para calcular la altura del tanque se consideran 3 partes:

$$\text{Altura de la sedimentación libre: } H_1 = 1.00\text{m (experimental)} \quad (4-40)$$

$$\text{Altura de la zona de compresión: (Tiempo de retención 36 horas, experimental)}$$

$$H_2 = \frac{\text{Tiempo de retención} \times \text{Volumen lodos compactados}}{\text{Área espesador}} \quad (\text{Lothar, 1985}) \quad (4-41)$$

$$H_2 = \frac{36 \text{ horas} \times 128.19 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{196.83 \text{m}^2} = 0.977 \text{ m}$$

$$\text{Altura de la zona de remoción: } H_3 = 0.4\text{m (Experimental)}$$

$$\text{Altura total espesador} = 2.5 \text{ m}$$

- Volumen del Espesador:

$$\text{Volumen del espesador} = \text{Área espesador} \times \text{Altura total}$$

$$\text{Volumen del espesador} = 196.83 \times 2.5 = 492.75 \text{ m}^3$$

*Filtro Prensa.* Para calcular el número de filtros que se necesitan para el proyecto se realizan las siguientes operaciones, tomando en cuenta que se tiene una disponibilidad de 3 ciclos/día:

$$\text{Carga volumétrica}_{\text{Ciclo}} = \frac{\text{Volumen lodos a la salida del filtro}}{\frac{\# \text{ ciclos}}{\text{d}}} \quad (\text{CEPIS, 2005c}) \quad (4-42)$$

Para calcular la densidad que tendrían los lodos en la salida del filtro es posible aplicar la siguiente ecuación (4-33):

$$\varphi_{\text{lodos}} = \frac{100}{\frac{65\%}{1.35} + \frac{35\%}{1}} = 1.2 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

$$\text{masa lodos}_{\text{salida filtro prensa}} = \frac{\text{Lodos base seca}}{\% \text{ sólidos deseado}} \quad (4-43)$$

$$\text{masa lodos}_{\text{salida filtro prensa}} = \frac{11.81 \frac{\text{ton}}{\text{d}}}{35\%} = 18.17 \frac{\text{ton}}{\text{d}}$$

$$\text{Volumen lodos}_{\text{filtro prensa}} = \frac{\text{masa lodos}_{\text{salida filtro prensa}}}{\varphi_{\text{lodos}_{\text{filtro prensa}}}} \quad (4-44)$$

$$Masa\ lodos_{salida\ filtro\ prensa} = \frac{18.17 \frac{ton}{d}}{1.2 \frac{ton}{m^3}} = 15.11 \frac{m^3}{d}$$

Entonces se calcula la carga volumétrica por ciclo, al considerar el volumen en la salida del filtro prensa como la carga volumétrica total:

$$Carga\ volumétrica_{ciclo} = \frac{15.11 \frac{m^3}{d}}{2 \frac{ciclos}{d}} = 7.55 \frac{m^3}{ciclo}$$

Para ayudar en los cálculos se presenta la Tabla 4.7, que proporciona las dimensiones de filtros-prensa, con diferentes tamaños de placa filtrante y volúmenes de torta para diferentes espesores; tomando en cuenta un total de 80 placas filtrantes. Como la carga volumétrica en la salida del espesador es muy importante aún, se tomará para el cálculo el filtro más grande (placas de 1.5 m x 1.5 m, espesor de 25 mm y volumen de torta de 3.2 m<sup>3</sup>).

**Tabla 4.7 Dimensiones filtros-prensa más comunes  
(CEPIS, 2005b)**

Dimensión de la placa	Área filtrante por placa (m <sup>2</sup> )	Volumen de la torta por placa		
		Espesores [mm] y Vol [l]		
		20 mm	25 mm	30 mm
0.80 m x 0.80 m	1.4	13	16	19
1.20 m x 1.20 m	3.0	29	36	40
1.50 m x 1.50 m	4.0	36	40	54

$$Filtros\ prensa\ necesarios = \frac{Carga\ volumétrica_{ciclo}}{Capacidad\ máxima\ filtro} \quad (4-45)$$

$$Filtros\ prensa\ necesarios = \frac{7.55 \frac{m^3}{ciclo}}{3.2 m^3} = 2.36$$

Para el resultado obtenido lo recomendable sería adquirir un equipo más, es decir, tener tres líneas de filtrado a presión, sin embargo ya se ha comentado que la inversión inicial para estos equipos es alta por lo que es posible aumentar el horario de trabajo a 10 horas/día y así cumplir 3 ciclos de 3 horas:

$$Carga\ Volumétrica_{ciclo} = \frac{15.11 \frac{m^3}{d}}{3 \frac{ciclos}{d}} = 5.04 \frac{m^3}{ciclo}$$

Por lo que:

$$Filtros\ prensa\ necesarios = \frac{5.04 \frac{m^3}{ciclo}}{3.2 m^3} = 1.575$$

Sin embargo, la carga de trabajo asociada con la capacidad instalada sería de tan sólo del 80%. Es posible entonces, adquirir equipos de menor capacidad, algunas de las opciones pueden ser las siguientes: Un equipo con menor área filtrante, el mismo espesor de placa y las mismas placas; un equipo con la misma área filtrante, pero con menor espesor de placa y las mismas placas; un equipo con mayor cantidad de placas, el mismo espesor y un área filtrante menor. Existen muchas combinaciones posibles y mediante un análisis de

evaluación de proyectos de inversión, como el método de la TIR (tasa interna de retorno), se podría encontrar la combinación más adecuada, sin embargo la falta de información financiera que brindan los ofertantes, lleva este análisis fuera de los alcances de este estudio de prefactibilidad. Se probará con un equipo con la misma área filtrante pero menor espesor de placa (20mm) que ofrece 2.88m<sup>3</sup> para 80 placas:

$$\text{Filtros prensa necesarios} = \frac{5.04 \frac{m^3}{\text{ciclo}}}{2.88 \frac{m^3}{\text{filtro}}} = 1.75 \approx 2 \text{ filtros}$$

Con un % de utilización de 87.5%.

*Filtros banda.* - Para el caso particular de la planta que se está dimensionando, los lodos ya han pasado por un proceso de espesamiento secundario y la concentración de sólidos se puede estimar en 9%. Como se puede observar en la Tabla 4.8 la alimentación, en galones por hora, es una función del ancho de la banda de compresión.

**Tabla 4.8 Dimensiones generales de filtros banda para diferentes tipos de lodos (EPA, 1987)**

Tipo de lodo	% sólidos en los lodos	Tasa de alimentación de lodos (gph)	Tasa de alimentación en base seca (lb/h)	Tasa de consumo polímero lb/tonb.s.	% sólidos en la torta
Lodos municipales activados provenientes de plantas de tratamiento	1.5	5995 (1.0m) 8912 (1.5m) 11990 (2.0m)	750 (1.0m) 1115 (1.5m) 1500 (2.0m)	8-10	Más de 18
Lodos provenientes de una planta de tratamiento anaeróbico de aguas	3.6	3230 (0.5m) 4796 (1.0m) 6461 (1.5m)	970 (1.0m) 1440 (1.5m) 1940 (2.0m)	8-12	Más de 22
Lodos municipales activados primarios y secundarios de una planta de tratamiento	3.25	4150 (0.5m) 6161 (1.0m) 8300 (2.0m)	1125 (1.0m) 1670 (1.5m) 2250 (2.0m)	8-10	Más de 25
Espumas de flotación	8.2	2120 (1.0m) 3180 (1.5m) 4240 (2.0m)	1450 (1.0m) 2175 (1.5m) 2900 (2.0m)	10-12	Más de 30

También se puede dimensionar con la tasa de entrada en sólidos de base seca en libras por hora. En la misma tabla se pueden observar los requerimientos de polielectrolito y el porcentaje final de sólidos que se puede alcanzar.

$$\text{Tasa de entrada}_{\text{base seca}} \left[ \frac{lb}{\text{hora}} \right] = 11,810 \frac{kg}{d} \left( \frac{2.2046 lb}{1 kg} \right) \left( \frac{1 d}{10 \text{ horas}} \right)$$

$$\text{Tasa de entrada}_{\text{base seca}} = 2,603.63 \frac{lb}{\text{hora}}$$

Para introducir uno sólo de estos equipos en la planta, es necesario aumentar el horario de trabajo de este equipo a 10 horas por turno, con lo que el ancho de la banda sería de 2.0m. Sin embargo, lo recomendable es tener dos líneas por si alguna de ellas necesita mantenimiento o tiene una falla inesperada.

Entonces:

$$Tasa\ de\ entrada\ \frac{p}{BP}_{base\ seca} = 11,810\ \frac{kg}{d} \left( \frac{2.2046\ lb}{1\ kg} \right) \left( \frac{1\ d}{6\ horas} \right) \left( \frac{1}{2\ BP} \right)$$

$$Tasa\ de\ entrada_{base\ seca} = 2,169.69\ \frac{lb}{hora}$$

Es decir, serán necesarios dos equipos con una banda de 1.5 m de ancho, funcionando 6 horas y es posible esperar un contenido de humedad de 35% con el uso de floculante.

*Tamizado y empaclado.*- Una envasadora como la que se muestra en la Figura 4.4 puede envasar hasta 8 sacos de 60 kg en un minuto. Para determinar la capacidad del equipo se emplea el siguiente modelo:

$$\# \text{ de sacos a envasar por minuto} = \frac{Masa\ lodos_{salida\ filtro\ prensa}}{Capacidad\ del\ saco} \quad (4-46)$$

$$\# \text{ de sacos a envasar} = \frac{18,170\ \frac{kg}{d} \left( \frac{1d}{8h} \right) \left( \frac{1h}{60min} \right)}{50\ \frac{kg}{saco}} = 0.75\ \frac{sacos}{min} \approx 1\ \frac{saco}{min}$$

Por lo tanto el equipo es más que adecuado para satisfacer nuestras necesidades de producción. Además cuenta con una precisión de  $\pm 40g$  que significa el 0.08%, por lo que permitiría satisfacer las necesidades de calidad de los clientes.



**Figura 4.4 Envasadora electrónica para granulados (COMAIZ, 2010)**

#### 4.1.1.11 Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero

Para calcular el beneficio ecológico que generaría la implementación de este proyecto, primero se determinará el daño que provocaría la liberación de biogás, proveniente de 150 ton de residuos orgánicos que no recibirían tratamiento.

De la ecuación (4-15):

$$Producción\ biogás = \left( 400\ \frac{m^3}{ton\ MV} \right) \left( 20.25\ \frac{ton\ MV}{día} \right) = 8,100\ \frac{m^3}{día}$$

Este biogás contiene 60% de CH<sub>4</sub> y 30% de CO<sub>2</sub>, así que lo siguiente es calcular las toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes que se liberarían a la atmósfera.

El CO<sub>2</sub> que se generaría por la descomposición de los residuos estará dado por la siguiente ecuación:

$$\text{Generación CO}_2 = \text{caudal biogás} \times \% \text{CO}_2 \text{ en el biogás} \times \text{densidad}_{\text{CO}_2} \quad (4-47)$$

$$\text{Generación CO}_2 \text{ descomposición} = 8,100 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \times 30\% \times 0.00156 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Generación CO}_2 \text{ descomposición} = 3.79 \frac{\text{ton}}{\text{d}} \text{CO}_2 \text{e}$$

Ahora para el daño que generaría el metano en tonCO<sub>2</sub> equivalente, usaremos un procedimiento similar, sólo que ahora aplicaremos un factor de conversión de 21, pues como se mencionó en los antecedentes, el metano es 21 veces más nocivo para el efecto invernadero que el dióxido de carbono.

$$\text{Generación CO}_2 \text{ conversión de CH}_4 = \text{caudal biogás} \times \% \text{CH}_4 \times \text{densidad}_{\text{CH}_4} \times 21$$

$$\text{Generación CO}_2 \text{ por conversión de CH}_4 = 8,100 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \times 60\% \times 0.000714 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \times 21$$

$$\text{Generación CO}_2 \text{ por conversión de CH}_4 = 72.87 \frac{\text{ton}}{\text{d}} \text{CO}_2 \text{e}$$

El daño total producido al ambiente es la suma de estas dos cantidades:

$$\text{Generación CO}_2 \text{e total} = 72.87 \frac{\text{ton}}{\text{d}} \text{CO}_2 \text{e} + 3.79 \frac{\text{ton}}{\text{d}} \text{CO}_2 \text{e}$$

$$\text{Generación CO}_2 \text{e total por degradación} = 76.66 \frac{\text{ton}}{\text{d}} \text{CO}_2 \text{e}$$

Como para este proyecto se considera sustituir un combustible convencional como lo es la gasolina, por uno más limpio como lo es el metano. Existe un daño al medio ambiente que puede ser medido en emisiones de CO<sub>2</sub> debido a la combustión sucia de la gasolina.

Para encontrar el daño actual que se mitigaría con el desarrollo de este proyecto se debe encontrar la cantidad de litros de gasolina magna que serían sustituidos y lo que contaminarían estos automóviles usándolos. La equivalencia entre un m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> y un litro de gasolina magna es de 1.13 (Ferré y Fuchs, 2009). Y el factor de emisión de contaminantes para un litro de gasolina se obtiene del promedio de la Tabla 4.9. La última columna se obtiene multiplicando la emisión en g/L por el rendimiento medio del vehículo y convirtiendo a kg/L.

**Tabla 4.9 Emisión de CO<sub>2</sub> por tipo de vehículo (CONUEE, 2010a)**

Marca/modelo	Rendimiento (km/L)	Emisión CO <sub>2</sub> (g/km)	Emisión CO <sub>2</sub> (kg/L)
SENTRA/2008	10.20	205	2.091
TSURU/2008	12.70	156	1.981
PLATINA/2008	12.8	156	1.996
CHEVY/2008	13.18	148	1.950
POINTER/2008	10.93	174	1.902
JETTA/2008	9.87	230	2.270
PROMEDIO			2.032

*Emisión de CO<sub>2</sub> por quema gasolina = litros a sustituirse × emisión promedio (4-48)*

$$\mathbf{Litros\ de\ magna\ a\ sustituirse = Caudal\ metano\ destinado\ a\ GNV \times 1.13}$$

$$\mathbf{Litros\ de\ magna\ a\ sustituirse = 1,642.35 \frac{m^3}{d} \times 1.13 \frac{L\ gasolina}{m^3\ GNV}}$$

$$\mathbf{Litros\ de\ magna\ a\ sustituirse = 1,855.86 \frac{L\ magna}{d}}$$

$$\mathbf{Emisión\ CO_2\ quema\ gasolina = 1,855.86 \frac{L\ magna}{d} \times 2.032 \frac{kg\ CO_2}{L\ magna} \times \frac{1\ ton}{1,000\ kg}}$$

$$\mathbf{Emisión\ de\ CO_2\ por\ quema\ gasolina = 3.77 \frac{ton\ CO_2e}{d}}$$

Entonces la contaminación total que el proyecto podría disminuir es:

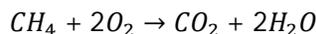
$$\mathbf{Emisión\ total\ de\ CO_2\ sin\ proyecto = 80.43 \frac{ton\ CO_2e}{d}}$$

Ahora bien, la implantación de este proyecto generaría dos importantes disminuciones en la cantidad de CO<sub>2</sub>e que se determinó. La primera se produce en la quema del CH<sub>4</sub> en el sistema de generación de energía, ya que al transformar el CH<sub>4</sub> en CO<sub>2</sub> el daño es 21 veces menor y la segunda se produce al sustituir la gasolina magna en los vehículos, pues como ya se ha revisado en este capítulo, es un hecho que la combustión de metano es mucho más limpia.

Primero se calculará el daño que se generaría de la implementación del proyecto y la diferencia entre éste y el daño sin la implementación del mismo, será el beneficio ambiental del proyecto. Se comenzará por el daño generado por la combustión del metano en el sistema de cogeneración. De la ecuación (4-23) se obtuvo que:

$$\mathbf{Gasto\ en\ generación_{metano} = \frac{1,072\ kW \left( \frac{kJ}{s} \right) \left( \frac{3600s}{1\ hora} \right)}{8,100 \frac{kcal}{m^3} \left( \frac{4.186\ kJ}{1\ kcal} \right)} = 113.82 \frac{m^3}{hora}}$$

Ahora, la ecuación para la oxidación del metano es:



Entonces el factor de estequiometría (R<sub>e</sub>) es 1, pues al quemarse una molécula de CH<sub>4</sub> se produce exactamente una molécula de CO<sub>2</sub>.

Para determinar cuántas moléculas de CH<sub>4</sub> están quemándose en el sistema de cogeneración basta con aplicar la siguiente ecuación:

$$\mathbf{Moles\ de\ CH_4\ quemadas = \frac{caudal\ de\ metano}{masa\ molar\ CH_4}} \quad (4-49)$$

$$\text{Moles de CH}_4 \text{ quemadas en cogeneración} = \frac{1.95 \frac{\text{ton}}{\text{d}}}{16 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times \frac{1\text{ton}}{10^6 \text{g}}}$$

$$\text{Moles de CH}_4 \text{ quemadas en cogeneración} = 121,899.67 \frac{\text{moles CH}_4}{\text{dia}}$$

Para calcular las toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes que se generarían de la combustión de esta cantidad de moléculas de CH<sub>4</sub> se aplicará la siguiente ecuación (4-50):

$$\text{Generación CO}_2 \text{ quema de CH}_4 = \text{moles CH}_4 \text{ quemadas} \times R_e \times \text{masa molar CO}_2$$

$$\text{Generación quema CO}_2 = 121,899.67 \frac{\text{moles CH}_4}{\text{dia}} \times 1 \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol CH}_4} \times 44 \frac{\text{g}}{\text{mol CO}_2} \times \frac{1\text{ton}}{10^6 \text{g}}$$

$$\text{Generación CO}_2 \text{ quema de CH}_4 \text{ en cogeneración} = 5.36 \frac{\text{ton CO}_2 \text{e}}{\text{dia}}$$

Ahora, de las moléculas que se queman en los coches por la utilización del metano como combustible vehicular se genera otra cantidad de CO<sub>2</sub> que se calcula de la misma forma, obteniendo la cantidad de moléculas a quemar en los coches con la ecuación (4-49) y calculando la generación de CO<sub>2</sub> en la combustión, con la ecuación (4-50). Cabe resaltar que estos cálculos son teóricos pues no está incluido un factor por la eficiencia en la combustión de ambos sistemas: El sistema de cogeneración y los motores automotrices.

$$\text{Moles de CH}_4 \text{ quemadas en coches} = \frac{1.17 \frac{\text{ton}}{\text{d}}}{16 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times \frac{1\text{ton}}{10^6 \text{g}}}$$

$$\text{Moles de CH}_4 \text{ quemadas en coches} = 73,290.08 \frac{\text{moles CH}_4}{\text{dia}}$$

$$\text{Generación quema CO}_2 = 73,290.08 \frac{\text{mol CH}_4}{\text{dia}} \times 1 \frac{\text{mol CO}_2}{\text{mol CH}_4} \times 44 \frac{\text{g}}{\text{mol CO}_2} \times \frac{1\text{ton}}{10^6 \text{g}}$$

$$\text{Generación CO}_2 \text{ quema de CH}_4 \text{ en coches} = 3.22 \frac{\text{ton CO}_2 \text{e}}{\text{dia}}$$

El daño total en emisiones de CO<sub>2</sub> generado por el proyecto es la suma de las emisiones de las combustiones en los dos tipos de motor.

$$\text{Generación CO}_2 \text{e total} = 5.36 \frac{\text{ton}}{\text{d}} \text{CO}_2 \text{e} + 3.22 \frac{\text{ton}}{\text{d}} \text{CO}_2 \text{e}$$

$$\text{Generación CO}_2 \text{e total con proyecto} = 8.59 \frac{\text{ton}}{\text{d}} \text{CO}_2 \text{e}$$

Por último, el ahorro en emisiones será la diferencia entre la emisión de CO<sub>2</sub> sin el proyecto y la emisión de CO<sub>2</sub> resultante de su implementación, es decir:

$$\text{Disminución total de emisiones} = 80.43 \frac{\text{ton CO}_2 \text{e}}{\text{d}} - 8.59 \frac{\text{ton}}{\text{d}} \text{CO}_2 \text{e}$$

$$\text{Disminución total de emisiones} = 71.84 \frac{\text{ton CO}_2 \text{e}}{\text{d}}$$

#### 4.1.2 Diseño y distribución de planta

Para finalizar la propuesta técnica se realizará un diagrama de distribución de planta retomando los procesos que se han dimensionado hasta el momento sobre el terreno propuesto y tomando en cuenta las instalaciones auxiliares, que se lista a continuación:

- a. Oficinas administrativas. La estructura administrativa del sistema tendrá una gerencia general que coordinará los esfuerzos del personal de toda la planta, en especial se dirigirá a los gerentes de las cuatro áreas principales: Digestión, recuperación de materiales, fertilizante, gas metano comprimido.

Para evitar que la estructura administrativa de las plantas se vuelva demasiado robusta, incurriendo innecesariamente en gastos fijos y enfocándose de forma más productiva en la cadena de valor propia del sistema, se recurrirá a subcontratación de los siguientes servicios:

- i. Contabilidad fiscal y asistencia legal, mantenimiento, seguridad privada y limpieza, planeación, servicios de informática, mercadotecnia y promoción

Aun así el gerente general de la planta debe tener sólidos conocimientos de finanzas, que contrastados con los perfiles técnicos de los gerentes de área, deben resultar en la toma de las mejores decisiones enfocadas en la rentabilidad del sistema.

Se contará con una gerencia de contabilidad general administrativa para tener el control de la información de los recursos de la planta dentro de ella y con el objetivo de elaborar los informes financieros al final de cada periodo.

La fuerza de ventas estará constituida de un gerente comercial, un Vendedor Sr y una pareja de Vendedores Jr para el fertilizante y materiales reciclables.

- b. Almacenes de materia prima y producto terminado

Existen, dentro de la teoría de investigación de operaciones tradicional, varios modelos matemáticos para el cálculo de la cantidad óptima a producir. La mecánica que utilizan es encontrar el punto en el cual el costo asociado al almacenamiento y el costo de no almacenar y perder una venta por una demanda inesperada, son iguales.

No está dentro de los alcances de este trabajo la determinación de un lote óptimo de producción debido a que no se han realizado los estudios de mercado para fertilizante y materiales reciclables que nos brinden más información sobre la demanda, como por ejemplo, si la misma se puede considerar lineal o no, el tiempo de entrega necesario y la distribución de probabilidad que se asemeja a las cantidades requeridas con respecto al precio; además, los modelos antes mencionados se enfocan en los "sistemas pull" (los sistemas pull o jalar son sistemas controlados por el mercado, es decir se produce lo que el mercado exige) y en este caso la planta cubre cabalmente con una demanda bien identificada que es la de tratamiento de los residuos y gracias a esta transformación es que se obtienen las cantidades de productos que se han dimensionado. Lo mejor que se hace es calcular el área en el cual se podría almacenar la producción de 6 meses, que es el tiempo de espera entre cosecha y cosecha, de la siguiente manera:

Dimensiones de un costal lleno: 60 cm largo, 40 cm ancho, 25 cm de alto.

$$\#Sacos\ producido_{6\ meses} = 0.75 \frac{saco}{min} \left( \frac{60min}{h} \right) \left( \frac{8h}{d} \right) \left( \frac{180d}{periodo} \right) \quad (4-51)$$

$$\#Sacos\ producido_{6\ meses} = 64,800 \frac{sacos}{periodo}$$

Si es posible estibar 10 sacos entonces el área a ocupar será de:

$$\text{Área de almacén} = \text{Área saco} \left( \frac{\#Sacos\ producido_{6\ meses}}{\#Sacos\ a\ estibar} \right) \quad (4-52)$$

$$\text{Área de almacén} = (0.6 \times 0.4) \times \frac{64,800}{10} = 1,555.2m^2$$

Si no se contara con el espacio suficiente se puede recurrir a sistemas de almacenaje más avanzados como la paletización y las diferentes opciones de racks en el mercado. La idea es estibar una cantidad adecuada para que los empaques sufran el menor daño posible durante el periodo de almacenamiento, acomodándolos en tarimas que a su vez se apilan en una estructura mecanizada para que al final la altura que pueda ser aprovechable sea máxima y el área la mínima. Ésto requiere de la implementación de algunos equipos para el manejo de estos pallets tales como montacargas y elevadores.

- c. Sanitarios y Vestidores. Es este caso es necesario incluir regaderas por el tipo de materiales con el que se trabajará a diario.
- d. Comedor. Debe ser un área limpia y adecuada para que el personal consuma los alimentos y recupere las energías y el ánimo para que pueda seguir desempeñando su función sin mermar la productividad.
- e. Áreas libres, de descarga y maniobras. Son espacios destinados a facilitar el flujo de personal y equipo en caso de emergencia. Se debe tener en cuenta que es necesario cumplir con las normas de seguridad industrial dejando espacio para las rutas de personas entre los diferentes equipos de proceso y accesibilidad para el mantenimiento. Se debe calcular el área mínima necesaria para que los vehículos puedan maniobrar sin peligro de accidentes y retraso de tiempos por atascos.

En la Figura 4.5 se presenta una propuesta de distribución de planta enfocada a minimizar el movimiento de materiales, debido a que la mayoría de los equipos son semi-automáticos y hay tiempo suficiente para que los operarios se desplacen, mientras que cada metro que el material se deba mover implica un costo adicional para el sistema reduciendo la rentabilidad e incluso volviendo necesaria la utilización de más equipos.

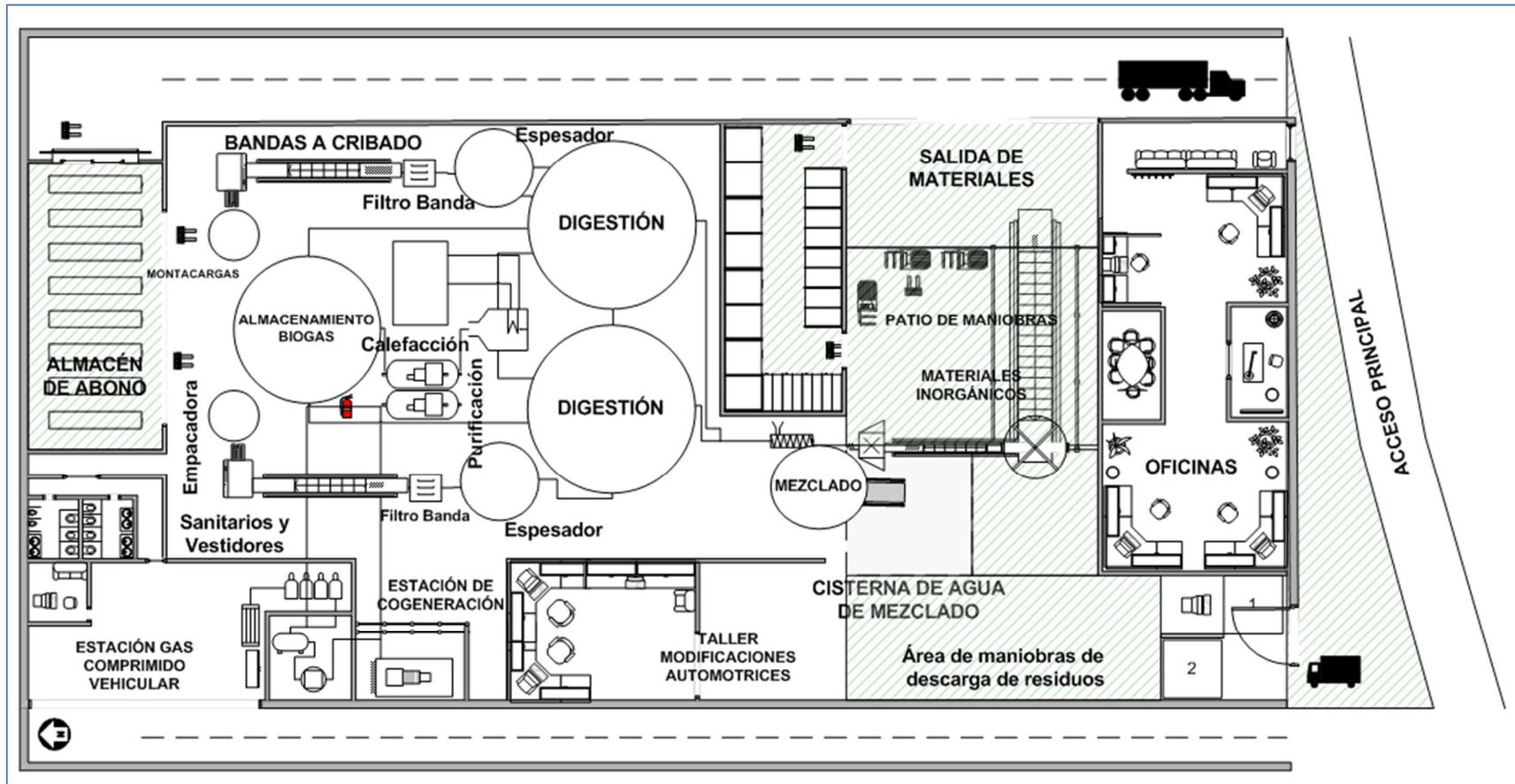


Figura 4.5 Propuesta para la distribución de la planta de biogás

### 4.1.3 Resumen de datos y valoración técnica

Para definir si el proyecto es técnicamente viable se presentan las Tablas 4.10 a 4.20 que muestran un resumen de las dimensiones de los diferentes procesos, con la finalidad de tener los resultados de los cálculos realizados en el capítulo 3 de forma más accesible.

**Tabla 4.10 Características del sustrato**

Resumen de propiedades generales de la biomasa		
Propiedad	Valor	Unidades
Masa total entrante	150.00	ton
Volumen estimado	187.50	m <sup>3</sup>
Masa seca (MS)	27.00	ton
	33.75	m <sup>3</sup>
Masa volátil (MV)	20.25	ton
	25.31	m <sup>3</sup>

El alto contenido de humedad en los residuos hace necesario el uso de equipos especiales de molienda, sin embargo, la misma humedad puede ser aprovechada para los servicios de la planta volviendo el proceso ideal para las zonas donde el agua escasea y evitando que se generen lixiviados en los rellenos sanitarios, como se verá en el capítulo siguiente.

**Tabla 4.11 Potencial de los residuos para generar biogás**

Propiedad	Valor	Unidades
Densidad	0.8	ton/m <sup>3</sup>
Producción de biogás	400	m <sup>3</sup> /ton MV
% Masa seca (MS)	18%	-
% Masa volátil (MV)	75%	-
% Dilución	90%	

**Tabla 4.12 Parámetros para el proceso**

Resumen de parámetros para la operación del digestor				
Tiempo de Retención H.	15 días	Composición del biogás		
Temperatura de trabajo	55 °C	Metano (CH <sub>4</sub> )	60%	
% Secado de abono	65%	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	30%	
% Humedad absoluta en la región	32%	Ácido Sulfhídrico (H <sub>2</sub> S)	5%	
Densidad del metano	0.717 kg/m <sup>3</sup>	Vapor de agua	5%	
Temperatura media de la región	25.3 °C	Poder Calorífico metano	9,000	kcal/Nm <sup>3</sup>
Temperatura media del sustrato	25.3 °C	Capacidad calorífica Afluyente	4.186	KJ/kgK

Las dimensiones de los digestores se deben al alto contenido de humedad que se ha fijado en los parámetros de diseño, representando una inversión más grande que un sistema en seco, por la magnitud de las excavaciones, sin embargo permiten reducir el tiempo de

retención con un porcentaje de degradación muy similar, lo que representa ahorros en los costos energéticos del sistema a lo largo de la vida útil.

**Tabla 4.13 Resumen de las dimensiones del digestor**

<b>Volumen, altura y diámetro adecuado</b>		
Influyente total (Af)	331	ton/d
	338	m <sup>3</sup> /d
Volumen útil	5,063	m <sup>3</sup>
Volumen recomendado	7,363	m <sup>3</sup>
Volumen real	9,572	m <sup>3</sup>
No de digestores tentativo	2.00	
COV	2.75	kg/m <sup>3</sup>
Volumen p/digestor	4,786	m <sup>3</sup>
Altura tanque	5	m
Diámetro	35	m

Hay que resaltar que el agua utilizada para la dilución puede ser recirculada en el sistema por lo que no se requiere de este recurso más que para el arranque de la planta.

**Tabla 4.14 Resumen de las dimensiones del tanque de alimentación**

<b>Concepto</b>	<b>Cantidad</b>	
Volumen tanque de alimentación	1,316	m <sup>3</sup>
Altura	5	m
Diámetro	18	m
Volumen de agua necesaria para dilución	150	m <sup>3</sup> /d
Volumen de agua p/digestor	75	m <sup>3</sup> /d

**Tabla 4.15 Producción diaria de biogás**

<b>Concepto</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Producción de biogás	8,100	Nm <sup>3</sup> /d
	337.50	Nm <sup>3</sup> /h
Poder calorífico gas	5,400	kcal/Nm <sup>3</sup>

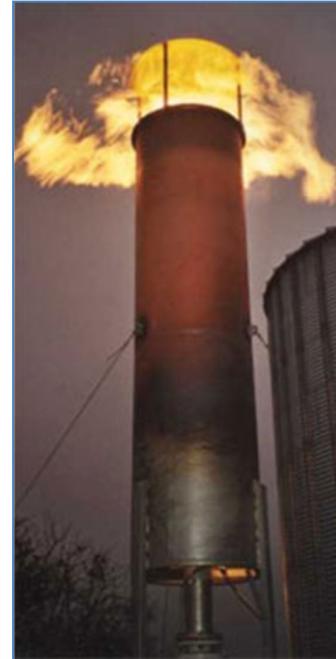
**Tabla 4.16 Alternativa para el almacenamiento antes de la purificación**

<b>Parámetro</b>	<b>Cantidad</b>	
% de la producción almacenada	100%	
No de tanques	2	
Volumen por tanque	4,050	Nm <sup>3</sup> /d
Altura tanque	5	m
Diámetro	32	m

Para tener una operación segura se debe considerar el uso de antorchas, como la que se muestra en la Figura 4.6, debido a que liberar el biogás no es una opción pues tiene repercusiones ambientales y de no disiparse eficientemente puede causar algún incendio. Estos equipos deben estar interconectados, incluso para desalojar y quemar el gas purificado que no haya sido consumido por los vehículos en la estación de suministro de metano comprimido, a pesar de que económicamente represente una pérdida de oportunidad y sea necesaria una inversión necesaria para su implementación.

**Tabla 4.17 Consideraciones para la purificación**

Purificación		
Producción de metano	4,374	Nm <sup>3</sup> /d
	182	Nm <sup>3</sup> /h
Poder calorífico metano	8,100	kcal/Nm <sup>3</sup>
Captura de dióxido de carbono	2,430	Nm <sup>3</sup> /d



**Figura 4.6 Antorchas para la quema de biogás (Moncayo, 2008)**

**Tabla 4.18 Energía térmica necesaria para el proceso**

Calefacción		
Espesor de hormigón (L)	0.40	m
Cte de conductividad térmica (k)	0.90	W/mK
Espesor de aislante (L)	0.15	m
Cte de conductividad térmica (k)	0.02	W/mK
Área de contacto p/digestor	2,462.94	m <sup>2</sup>
Pérdidas en calor p/unidad de área	3.74	W/m <sup>2</sup>
Pérdidas en calor p/digestor	9,207.60	W
Pérdidas en energía p/digestor	795.54	MJ/d
Pérdida total de energía	1.59	GJ/d
	18.42	kW
	24.69	hp
Energía para calentar afluente	41.12	GJ/d
	475.93	kW
	637.98	hp
Potencia requerida en cogeneración	494.34	kW
Porcentaje del gas producido	45%	

Para conservar la temperatura de los digestores se utilizará un material aislante con muy baja conductividad térmica, sin embargo con la carga continua de biomasa es necesario un suministro igualmente continuo de energía térmica. Para esto se había considerado una

caldera, pero al revisar los equipos de generación en la industria, se observó que la energía necesaria puede provenir directamente del ciclo de cogeneración, elevando la eficiencia de la planta y reduciendo costos. Un factor no considerado en ese momento fue la sensibilidad de las bacterias termofílicas, lo que hace indispensable el uso de un sistema de control avanzado con la correspondiente inversión en instrumentación. Nuevamente se incrementa la inversión inicial a favor de la disminución del tiempo de retención y la posibilidad de obtener biogás en cantidades más estables, asegurando además el contenido de metano.

**Tabla 4.19 Producción de energía eléctrica a partir de la planta de biogás**

Concepto	Cantidad	Unidad
Demanda de potencia en forma de biogás	1,072	kW
	3,859,200	kJ/hora
Consumo gas CHP	113	Nm <sup>3</sup> /hora
	2,731	Nm <sup>3</sup> /d

La producción de fertilizante orgánico, es otra de las ventajas técnicas que tiene esta tecnología con respecto a otras como la gasificación por plasma o la pirólisis. La mineralización de los compuestos que forman las moléculas orgánicas hace posible el regresar los nutrientes que se han tomado de la tierra, en forma y proporciones que además contribuyan a la explotación sustentable de las tierras de cultivo. Se generan alimentos más saludables, libres de compuestos químicos no deseables y de mejor sabor.

La idea es mejorar la estructura de los suelos, brindándole a los cultivos la capacidad de retener la cantidad óptima de humedad y de nutrientes,

**Tabla 4.20 Acondicionamiento de lodos**

Concepto	Cantidad	
Lodos base húmeda digestión	315.56	ton/d
Lodos en base seca	11.81	ton/d
%sólidos biodigestión	3.74%	%
Densidad lodos biodigestión	1.010	ton/m <sup>3</sup>
Lodos base húmeda biodigestión	312.50	m <sup>3</sup> /d
%sólidos espesador	9.00%	%
Densidad lodos espesador	1.02	ton/m <sup>3</sup>
Lodos base húmeda espesador	131.25	ton/d
Lodos base húmeda espesador	128.19	m <sup>3</sup> /d
<b>%sólidos</b>	<b>65%</b>	<b>%</b>
<b>Densidad abono</b>	<b>1.20</b>	<b>ton/m<sup>3</sup></b>
<b>Abono base húmeda en masa</b>	<b>18.17</b>	<b>ton/d</b>
Abono base húmeda en volumen	15.11	m <sup>3</sup> /d

Los alcances de la propuesta técnica acotados en la ingeniería básica, están limitados a arrojar resultados de pre-factibilidad. Si la evaluación financiera del proyecto resulta positiva conforme a los parámetros que se describirán a lo largo de lo que resta del

capítulo, será necesario proceder con la ingeniería de detalle y a repetir el análisis financiero.

## 4.2 Pre-factibilidad financiera

A continuación se presentarán los presupuestos de construcción y algunos estados proforma del proyecto para proceder al análisis financiero a través de las técnicas más empleadas en la evaluación de proyectos.

### 4.2.1 Inversión inicial fija

Se enlistan todos los conceptos de manera general que proceden de cotización directa con las empresas: Fluídica S.A., FYE de México S.A. de C.V., Incogás S.A., ACS Medio Ambiente y Equipamientos y Suministros Industriales S.A., con oficinas en la Ciudad de México

**Tabla 4.21 Primera parte de los activos fijos necesarios en planta**

CONCEPTOS INVERSIONES FIJAS	MONTO	
	MXP[\$]	
<b>Recepción de materiales</b>		
Instalaciones y equipos de recepción		
1 Báscula camionera	\$	1,798,000
1 Caseta de recepción	\$	25,000
1 Pluma y espinas	\$	20,000
1 Sanitario	\$	9,900
Subtotal	\$	<b>1,852,900</b>
<b>Sistema para la recuperación de materiales</b>		
Planta de recuperación de Materiales		
1 Banda inclinada con cangilones de arrastre		
1 Trommel de cernido		
1 Banda de selección		
1 Separador Magnético	\$	7,421,274
1 Gabinete de control		
1 Equipo de pre-trituración		
1 Molinos orgánicos		
1 Bobcat		
2 Montacargas	\$	1,726,080
Subtotal	\$	<b>9,147,354</b>
<b>Digestión</b>		
1 Tolva de recepción de materiales	\$	58,000
2 Digestores cilíndricos de hormigón	\$	13,638,851
2 Equipamiento de la planta	\$	3,425,003
Subtotal	\$	<b>17,121,854</b>
TOTAL	\$	<b>28,122,108</b>

**Tabla 4.22 Segunda parte de los activos fijos necesarios en planta**

<b>CONCEPTOS INVERSIONES FIJAS</b>		
<b>Acondicionamiento del mejorador de suelos</b>		
1	Tanque de sedimentación	\$ 2,000,000
2	Filtros Prensa de secado	\$ 2,963,104
1	Sistema de cribado de abono	\$ 200,000
1	Sistema de empacado de abono	\$ 79,692
1	Montacargas (Manejo de abono)	\$ 800,000
1	Sistema de almacenamiento de abono	\$ 60,000
	Subtotal	<b>\$ 6,102,796</b>
<b>Acondicionamiento de biogás</b>		
1	Almacenamiento de Biogás	\$ 2,000,000
2	Purificación del biogás	\$ 14,200,000
1	Antorchas de seguridad	\$ 968,600
1	Tubería e instalaciones	\$ 1,000,000
1	Estación integral despachado	\$ 1,875,673
	Subtotal	<b>\$ 20,044,273</b>
<b>Generación energética</b>		
1	Sistema Cogeneración	\$ 2,078,344
3	Transferencia automática de capacidad distinta	\$ 90,043
3	Accesorios para el control	\$ 13,937
1	Instalación eléctrica	\$ 2,791,909
	Subtotal	<b>\$ 4,974,234</b>
<b>Taller mecánico</b>		
2	Escáner	\$ 70,000
1	Alineación y balanceo	\$ 300,000
2	Equipo de cómputo	\$ 20,000
1	Herramental	\$ 100,000
1	Instalaciones	\$ 10,000
	Subtotal	<b>\$ 500,000</b>
<b>Oficinas</b>		
7	Equipo de cómputo	\$ 350,000
1	Obra civil	\$ 1,322,508
1	Mobiliario y equipo de oficina	\$ 446,600
1	Equipo de cómputo	\$ 98,600
	Subtotal	<b>\$ 2,217,708</b>
<b>Logística y transporte</b>		
4	Equipo de reparto	\$ 2,400,000
1	Vehículos	\$ 1,740,000
	Subtotal	<b>\$ 4,140,000</b>
	TOTAL	<b>\$ 37,979,013</b>
<b>Total inversiones fijas</b>		<b>\$ 66,101,121</b>

#### 4.2.2 Inversión inicial diferida

Tabla 4.23 Activos diferidos para la ejecución del proyecto

CONCEPTOS INVERSIONES DIFERIDAS		
<b>Gastos pre-operativos</b>		
Ingeniería de detalle	\$	1,297,897
Supervisión y puesta en marcha	\$	847,605
Gastos de Mercadotecnia, propaganda y publicidad	\$	2,000,000
Primas de seguro	\$	50,000
Imprevistos	\$	661,011
Proyecto MDL	\$	992,000
	Subtotal	<b>\$ 5,848,513</b>
<b>Constitución de la sociedad mercantil</b>		
Constitución de la sociedad ante la S.R.E.	\$	700
Aviso de uso de permisos para la constitución de sociedades.	\$	250
Inscripción de escrituras constitutivas de personas morales.	\$	500
Inscripción al registro federal del contribuyente	\$	-
Declaración de apertura.	\$	100
Alta en el sistema de información mexicano (SIEM)	\$	-
Notario	\$	15,000
	Subtotal	<b>\$ 16,550</b>
<b>Total Inversiones Diferidas</b>		<b>\$ 5,865,064</b>

#### 4.2.3 Inversión circulante

El capital de trabajo para este proyecto se calculará de la siguiente manera:

$$\text{Capital de trabajo} = C_p(\text{Duración ciclo}) \quad (4-53)$$

Donde  $C_p$  es el costo promedio diario de operación resultante del presupuesto de egresos y la duración del ciclo por supuesto se escribe en días. El ciclo de generación de ingresos para el proyecto se considera de 3 meses de periodo de gracia para la venta de fertilizante, más 60 días que es el periodo promedio que se espera tengan las cuentas por cobrar. El  $C_p$  se explicará mejor en la sección siguiente y es de \$33,617.15, entonces:

$$\text{Capital de trabajo} = \$33,617.15 \times (150) \approx \$5,000,000.00$$

#### 4.2.4 Presupuestos de egresos

Los costos también se determinaron a través de cotizaciones con las empresas Fluídica S.A., Incogás S.A., FYE de México S.A. de C.V., Kohler S.A., y Equipamientos y Suministros Industriales S.A. Aun así, los sueldos se analizaron y corroboraron con lo que se publica mes a mes en las principales bolsas de trabajo en línea de nuestro país (OCC, Monster, y Computrabajo).

Tabla 4.24 Costos de mano de obra

CONCEPTOS DE NÓMINA DIRECTA E INDIRECTA					
NÓMINA NECESARIA PARA LA BANDA					
Puesto	No	Sueldo diario	Prestaciones	Total	Total General
Seleccionadores	8	\$ 150.00	\$ 65.55	\$ 215.55	\$ 1,724.40
Alimentación de banda	3	\$ 150.00	\$ 65.55	\$ 215.55	\$ 646.65
Choferes (maquinaria)	4	\$ 250.00	\$ 109.25	\$ 359.25	\$ 1,437.00
<b>TOTALES</b>	<b>15</b>				<b>\$ 3,808.05</b>
NÓMINA DIGESTIÓN					
Puesto	No	Sueldo diario	Prestaciones	Total	Total General
Sistema de alimentación	3	\$ 150.00	\$ 65.55	\$ 215.55	\$ 646.65
<b>TOTALES</b>	<b>3</b>				<b>\$ 646.65</b>
NÓMINA ACONDICIONAMIENTO FERTILIZANTE					
Puesto	No	Sueldo diario	Prestaciones	Total	Total General
Filtros prensa	1	\$ 150.00	\$ 65.55	\$ 215.55	\$ 215.55
Empacado	3	\$ 150.00	\$ 65.55	\$ 215.55	\$ 646.65
Movimiento de materiales	2	\$ 150.00	\$ 65.55	\$ 215.55	\$ 431.10
Almacén	4	\$ 150.00	\$ 65.55	\$ 215.55	\$ 862.20
<b>TOTALES</b>	<b>10</b>				<b>\$ 2,155.50</b>
NÓMINA ACONDICIONAMIENTO DEL BIOGÁS					
Puesto	No	Sueldo diario	Prestaciones	Total	Total General
Filtración	1	\$ 150.00	\$ 65.55	\$ 215.55	\$ 215.55
Supervisor	1	\$ 280.00	\$ 122.36	\$ 402.36	\$ 402.36
Estación de servicio	2	\$ 150.00	\$ 65.55	\$ 215.55	\$ 431.10
Despachadores	4	\$ 150.00	\$ 65.55	\$ 215.55	\$ 862.20
<b>TOTALES</b>	<b>8</b>				<b>\$ 1,911.21</b>
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>			<b>\$</b>	<b>8,521.41</b>	<b>\$/d</b>

**Tabla 4.25 Insumos necesarios para el proceso de digestión y empaque**

Concepto	Precio (\$/kg,L)	Cantidad	Monto
Carbonato de Calcio	\$ 138.00	50.00	\$ 6,900.00
Total			\$ 6,900.00
Empacado	Precio (\$/c)	Cantidad	Total
Bolsas Cartón	\$ 5.00	360.00	\$ 1,800.00
Total			\$ 1,800.00
<b>TOTAL INSUMOS</b>		<b>\$ 8,700.00</b>	<b>\$/d</b>

**Tabla 4.26 Parte 1 Mantenimiento preventivo y correctivo de las instalaciones**

Concepto	Monto
<b>MANTENIMIENTO DE LA BANDA DE SELECCIÓN</b>	\$
Uniformes	\$ 240.00
Refacciones, equipo de transporte	\$ 22.00
Aceite equipo de transporte	\$ 22.00
Supersacos	\$ 420.00
Alimentador	
Transportador inclinado	
Trommel	
Banda de Selección	\$ 2,200.00
Transportador hundido	
Contenedores	
Molino ( Afilado de cuchillas )	
Banda Magnética	
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 2,904.00</b>
<b>MANTENIMIENTO DE LA ETAPA DE DIGESTIÓN</b>	\$
Limpieza tanque de mezclado	
Chequeo de válvulas de descarga	
Chequeo sopadores	
Chequeo sistema de cogeneración	
Chequeo cortallamas	\$ 1,000.00
Chequeo de filtros	
Amarres de Cubierta	
Equipo Electromecánico	
Trampas de agua y condensados	
Checar medidor de caudal de biogás	
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 1,000.00</b>

**Tabla 4.27 Parte 2 Mantenimiento preventivo y correctivo de las instalaciones**

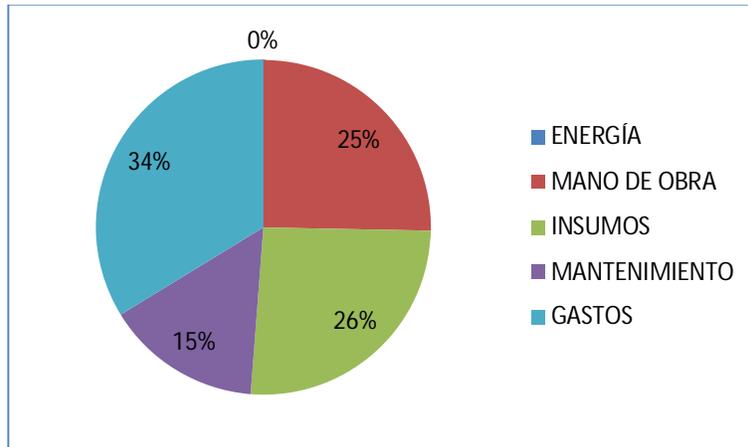
MANTENIMIENTO FERTILIZANTE		\$
Remoción de arenas		
Chequeo Filtros	\$	500.00
Limpieza Lechos de secado		
<b>TOTAL</b>	<b>\$</b>	<b>500.00</b>
MANTENIMIENTO BIOGÁS		\$
Chequeo Compresores		
Chequeo Surtidores	\$	343.12
Chequeo sistemas automotrices		
Generadores	\$	289.73
<b>TOTAL</b>	<b>\$</b>	<b>632.85</b>
<b>TOTAL MANTENIMIENTO</b>	<b>\$</b>	<b>5,036.85</b>

**Tabla 4.28 Costos fijos de la planta por tipo**

GASTOS ADMINISTRATIVOS			
Servicios			
	No	Diario	Mensual
Luz	\$	-	\$ -
Teléfono	\$	378.08	\$ 11,500.00
Papelería	\$	230.14	\$ 7,000.00
Gasolina	\$	-	\$ -
Radio-celular	\$	164.38	\$ 5,000.00
Otros	\$	263.10	\$ 8,000.00
<b>Subtotal</b>	<b>\$</b>	<b>1,035.62</b>	<b>\$ 31,500.00</b>
Recursos Humanos			
Recepcionista	1	\$ 263.01	\$ 8,000.00
Asistente, venta	1	\$ 493.15	\$ 15,000.00
Asistente administración	3	\$ 2,071.23	\$ 21,000.00
Asistente operaciones	1	\$ 493.15	\$ 15,000.00
Despacho contable	2	\$ 1,972.60	\$ 30,000.00
Gerente banda de selección	1	\$ 493.15	\$ 15,000.00
Gerente digestión	1	\$ 493.15	\$ 15,000.00
Gerente secado de lodos	2	\$ 1,643.83	\$ 25,000.00
Viajes	1	\$ 920.55	\$ 28,000.00
Mensajero 2	1	\$ 493.15	\$ 15,000.00
Gerente General	1	\$ 986.30	\$ 30,000.00
<b>Subtotal</b>		<b>\$ 13,183.55</b>	<b>\$ 269,000.00</b>
		Diario	Mensual
<b>GASTOS</b>		<b>\$ 11,358.89</b>	<b>\$ 248,500.00</b>

Los costos totales diarios promedio son de \$33,617, dato que se utiliza en el cálculo del capital de trabajo del punto anterior.

Como se puede observar en la Figura 4.7 el 34% de los egresos de la planta corresponde a los costos fijos y el correspondiente 66% se constituye de los costos variables, un valor que nos da indicios de un punto de equilibrio favorable.



**Figura 4.7 Estructura de costos de la planta de biogás**

#### 4.2.5 Presupuestos de Ingresos

Para esta siguiente fase se realiza una proyección a 5 años de los parámetros de producción con el fin de justificar los ingresos y su crecimiento.

Para actualizar la cantidad de residuos generada, se toma la tasa media anual de crecimiento de la región que es de 1.67% para los próximos 10 años, obtenida del Plan de Desarrollo Municipal del Puerto de Veracruz, y se utiliza el siguiente modelo:

$$\text{Generación de residuos año}_k = \text{Generación año}_{2011} (1 + \text{tasa})^{k-2011} \quad (4-54)$$

Por ejemplo, para calcular la generación de residuos en el 2018:

$$\text{Generación de residuos año}_{2018} = 150(1 + 0.0167)^{2018-2011} = 168.438 \frac{\text{ton}}{\text{d}}$$

Para el cálculo de los materiales reciclables, se toma en cuenta que la materia prima llegará con un 5% de impurezas que se constituyen de los diferentes materiales en la misma proporción que los RSU, y las proyecciones de las cantidades para los siguientes años resultan de aplicar el modelo (4-58) a cada material presentado en la Tabla 4.29.

La demanda de tratamiento también crecerá a una tasa exponencial de 1.67%, ésto se reflejaría directamente en la producción, no así en los ingresos obtenidos por la venta de los productos debido al periodo de gracia y la política de precios que se establecerá para el proyecto.

**Tabla 4.29 Crecimiento de la producción para los primeros 5 años de operación**

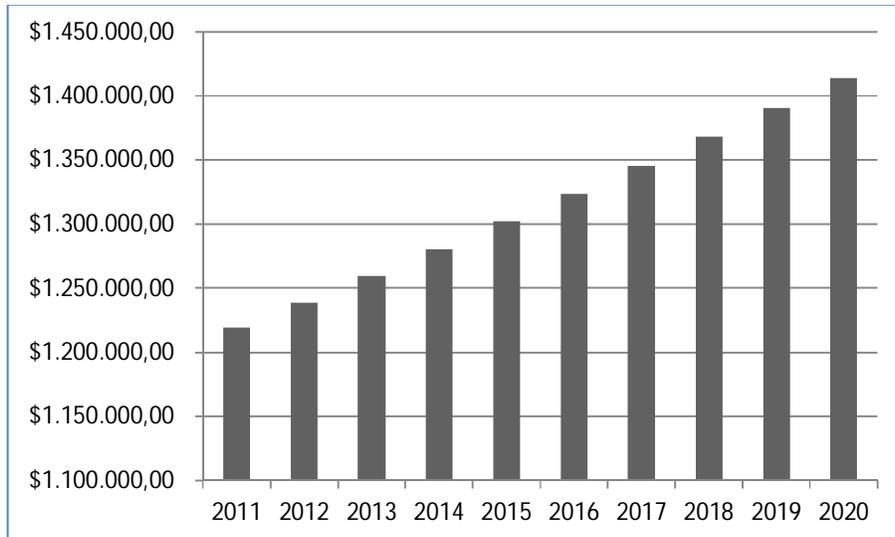
<b>DEMANDA DE TRATAMIENTO</b>						
Año		<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>
	ton/d	150	153	155	158	160
<b>PRODUCCIÓN DIARIA</b>						
Productos		<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>
<b>Plásticos</b>	ton/d	0.62	0.63	0.65	0.66	0.67
<b>Papel</b>	ton/d	0.88	0.89	0.91	0.92	0.94
<b>Cartón</b>	ton/d	0.37	0.38	0.39	0.39	0.40
<b>Tetrapack</b>	ton/d	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
<b>Vidrio</b>	ton/d	0.44	0.45	0.45	0.46	0.47
<b>Aluminio</b>	ton/d	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08
<b>Metales</b>	ton/d	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
<b>Gas CH<sub>4</sub> Vehicular</b>	m <sup>3</sup> /d	2,129	2,164	2,200	2,237	2,274
<b>Fertilizante</b>	ton/d	18.17	18.47	18.78	19.10	19.41
<b>tonCO<sub>2</sub>e</b>	tonCO <sub>2</sub> e/d	72.01	73.21	74.44	75.68	76.94

El crecimiento en la producción de las diferentes áreas de la planta se deriva del crecimiento exponencial que tiene la generación de residuos. En la Tabla 4.30 se muestran los precios promedio de los principales materiales reciclables.

**Tabla 4.30 Precios de los principales materiales reciclables (GTZ, 2006)**

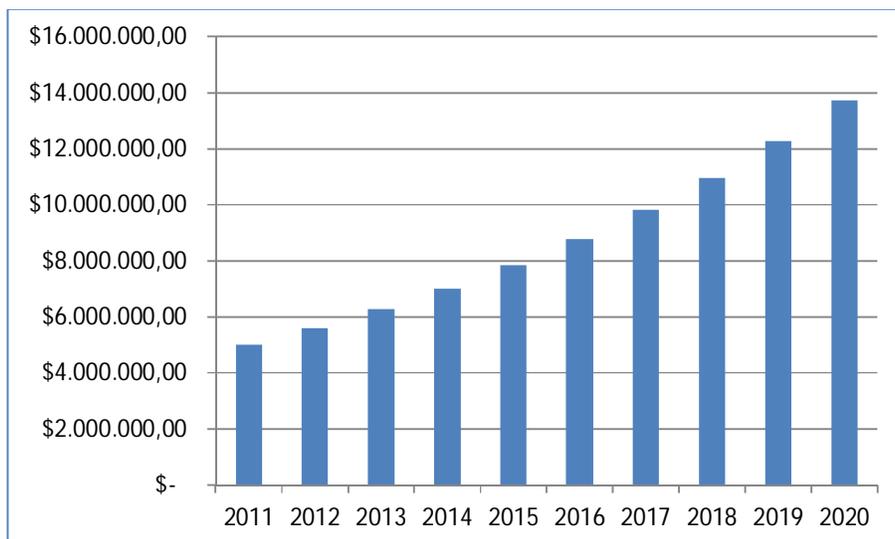
<b>Material</b>	<b>% promedio en los RSU</b>	<b>Precio promedio anual (\$/kg)</b>
Plásticos compactados	8.32	2.5
Papel en pacas	11.68	0.7
Cartón en pacas	4.98	0.8
Envase tetrapack en pacas	0.90	0.8
Vidrio molido	5.84	0.2
Aluminio compactado	0.99	8
Otros metales	1.16	1.5

Los ingresos por los materiales reciclables se obtienen multiplicando las cantidades de los diferentes materiales, que compondrían el 5% de 150 toneladas por día, por los precios promedio del mercado. El crecimiento que se refleja en la Figura 4.8 sólo se debe al crecimiento en la cantidad de residuos generados, no contempla un aumento en el precio de los materiales.



**Figura 4.8 Ingresos promedio por la venta de reciclables**

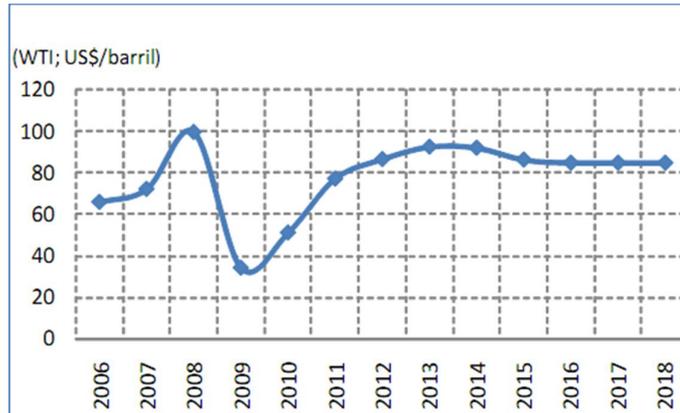
Los ingresos proyectados en la Figura 4.9 tienen que incluir, además de la política de precios, dos componentes, el incremento en el precio de los hidrocarburos (representado de alguna manera en la Figura 4.10) y el incremento en el tipo de cambio (Figura 4.11), esto produce el efecto exponencial en el crecimiento.



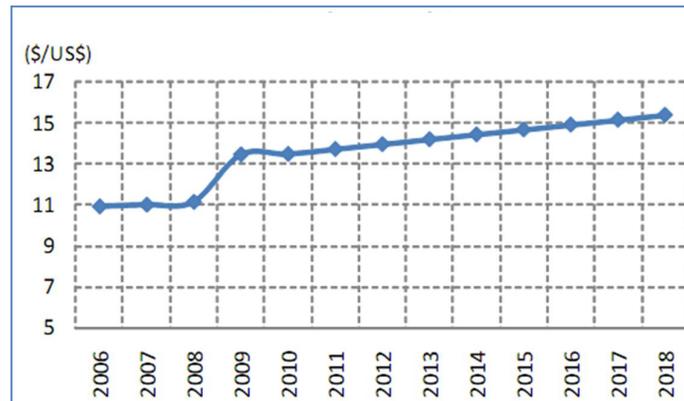
**Figura 4.9 Ingresos por la venta de gas metano comprimido**

La política de precios que se establece para el gas metano vehicular consiste en ofrecer un descuento constante del 25% con respecto al precio de la gasolina magna, que servirán

para que las personas puedan adquirir los equipos de conversión a través de financiamiento. La idea consiste en que las personas paguen lo mismo que si consumiesen gasolina y después de un periodo (en función del consumo) puedan disfrutar totalmente de los beneficios económicos del biocombustible. Se contempla que la difusión de los beneficios del gas comience al menos 3 meses antes del inicio de operaciones para que los ingresos se registren desde el primer día y no haya necesidad de quemar el purificado.

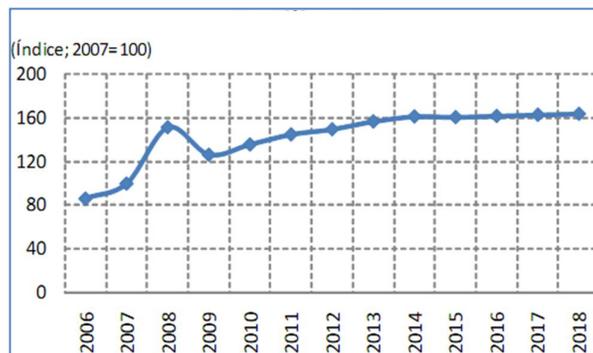


**Figura 4.10 Incremento del precio del petróleo en los próximos años (SIAP, 2008)**



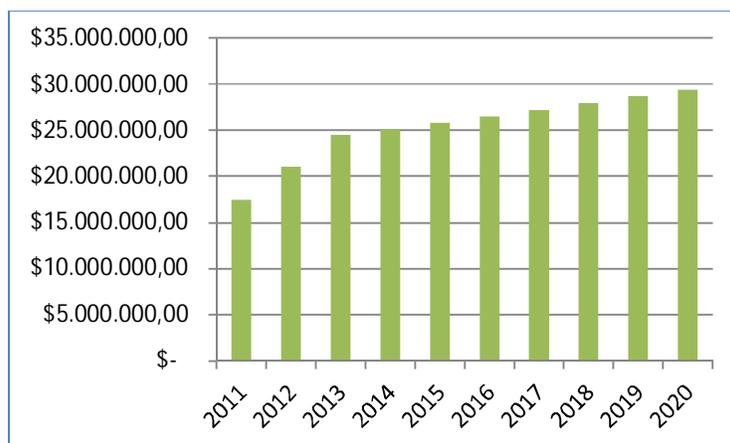
**Figura 4.11 Tipo de cambio proyectado para los próximos años (SAGARPA, 2010)**

Por lo que respecta al fertilizante se presenta la curva del incremento de precios que se proyecta para los años venideros:



**Figura 4.12 Incremento porcentual en el precio de los fertilizantes químicos (SAGARPA, 2010)**

Después del pico que se observa en 2008, los fertilizantes químicos iniciaron una baja en el precio pero sólo hasta el año pasado, ya que este año algunos han casi alcanzado su valor máximo y se espera sigan creciendo debido a su íntima relación con el precio del petróleo. Como son importados en su mayoría, se espera que el tipo de cambio también afecte la volatilidad. De éstas consideraciones y la multiplicación del precio unitario de fertilizante por las proyecciones de ventas, se obtiene la Figura 4.13.



**Figura 4.13 Ingresos por la venta de fertilizante**

Debido al poco conocimiento de los fertilizantes orgánicos en el mercado, para el fertilizante se tiene contemplado un exhaustivo plan de promoción. A pesar de iniciar la difusión meses antes, se contempla un periodo de gracia de tres meses para iniciar con la facturación. El precio de lanzamiento será de \$3.5 por kilogramo, precio competitivo según lo mostrado por la Tabla 4.31, pero una parte de la producción se regalará como promoción mientras se cierran más contratos de compra.

**Tabla 4.31 Precios de los principales abonos orgánicos (SAGARPA, 2009)**

Producto	Descripción	Presentación	Precio	Precio unitario \$/kg
OrganoDel	Abono orgánico procesado inoculado con bacterias aeróbicas termofílicas. Elaborado con estiércol de aves, bovinos, residuos orgánicos y vegetales	Costales de 30 kg	\$125.00	4.20
NaturAbono	Mejorador de suelos, procedente de tratamiento aerobio termofílico de RSU.	Costales de 35/50 kg	\$160.00	4.50
Abono de borrego Nutrigarden	Procedente de digestión aerobia, desinfectado, desodorizado, enriquecido con microorganismos	Bolsas de 1/5/10/20 kg	\$75.00 5kg	15.00

Por ser un insumo, la demanda de fertilizante es dependiente, lo que significa que para determinar la tasa de crecimiento se debe referenciar al índice del sector agrícola. Afortunadamente en países de América Latina y el Caribe el crecimiento del sector agroalimentario es contra cíclico al PIB y la recesión (SIAP, 2008). En México es aún más acentuado y quiere decir que en temporadas de recesión, el sector responde más rápido que la economía mundial.

La agricultura orgánica es un nicho de mercado muy atractivo para productores de América Latina. Ha crecido a razón de 10.4% anual, existen 1.4 millones de agricultores certificados y las ventas se estiman en 50 millones de dólares por año (SAGARPA, 2007). En México, 50 de cada 100 Has sembradas a través de las técnicas orgánicas, producen café y somos el primer lugar en el mundo en producción de café orgánico.

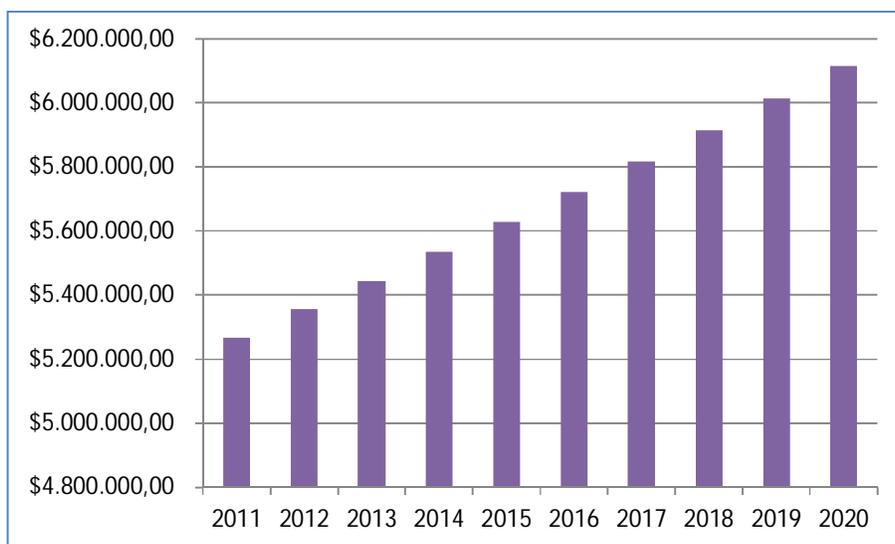
Debido a este importante segmento de mercado, sus perspectivas de crecimiento y el plan de promoción, la meta de venta es de 1.67% mensual durante los primeros 24 periodos. Después de este periodo se puede esperar un crecimiento sostenido al mismo ritmo que el resto de la planta.

Una de las bondades financieras que puede tener este proyecto es la posibilidad de comercializar los Certificados de Reducción de Emisiones, cuyo precio ronda los €12.00, la tonelada equivalente de CO<sub>2</sub>. Los ingresos generados por esta fuente son fijos mientras se cumpla con las metas y proyecciones del proyecto. Este cálculo se realizó en el punto 4.1.1.11 y se corrobora en la Figura 4.14.

Por ejemplo, para el primer año se contabilizó que se reducirán 72 ton/d de CO<sub>2</sub> equivalentes por lo que los ingresos totales serán:

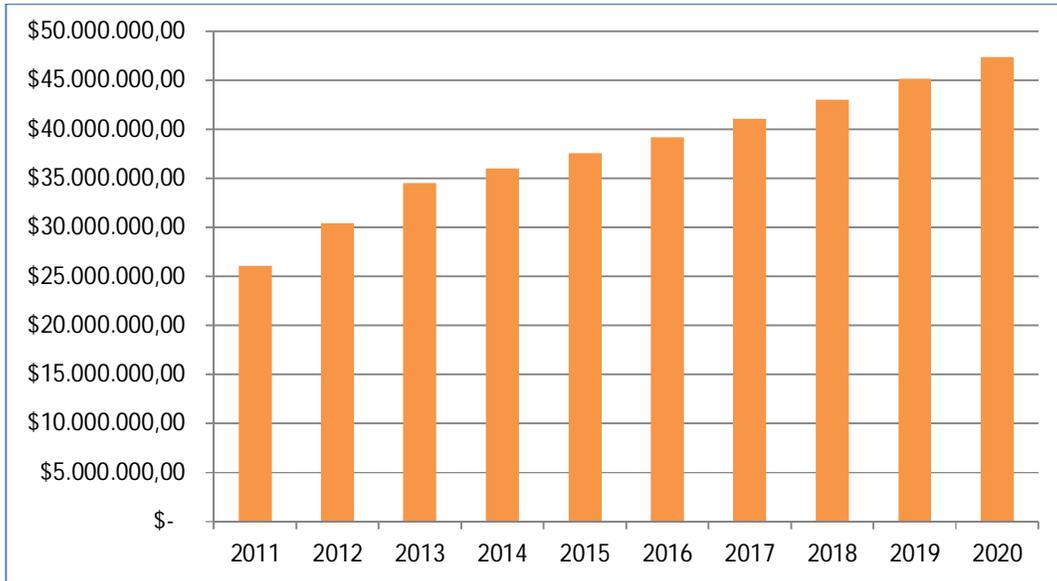
$$\text{Ingresos anuales venta de CERs} = 72 \frac{\text{ton CO}_2\text{e}}{\text{d}} \times \frac{365 \text{ d}}{\text{año}} \times 12 \frac{\text{€}}{\text{ton CO}_2\text{e}} \times \frac{16.7\$}{1\text{€}}$$

$$\text{Ingresos anuales por venta de CERs} = \$5,267,243.5$$



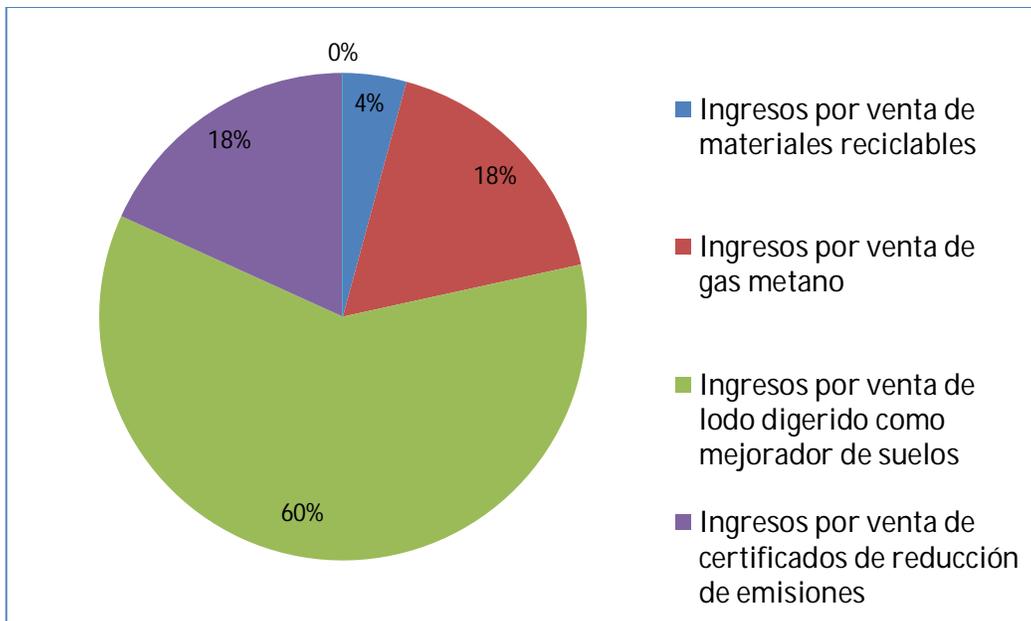
**Figura 4.14 Ingreso por la venta de certificados de reducción de emisiones**

La proyección de ingresos totales puede verse en la Figura 4.15.



**Figura 4.15 Ingresos totales generados por el proyecto**

También se hace un análisis de la importancia que tienen las diversas fuentes de generación de ingresos para el proyecto. Más del 60% de la facturación provendría del fertilizante, mientras que los bonos de carbono contribuirían con el 9% (Figura 4.16). La venta del gas, a pesar de ser un producto estrella para el proyecto, no genera tantos ingresos. La estrategia es cambiar el uso del gas para la generación de energía para la planta, por alguna otra fuente renovable como la solar y así utilizar cada vez más para la sustitución de la gasolina, generando mayores bonos de carbono y aumentando su participación en la facturación.



**Figura 4.16 Generación de ingresos por tipo**

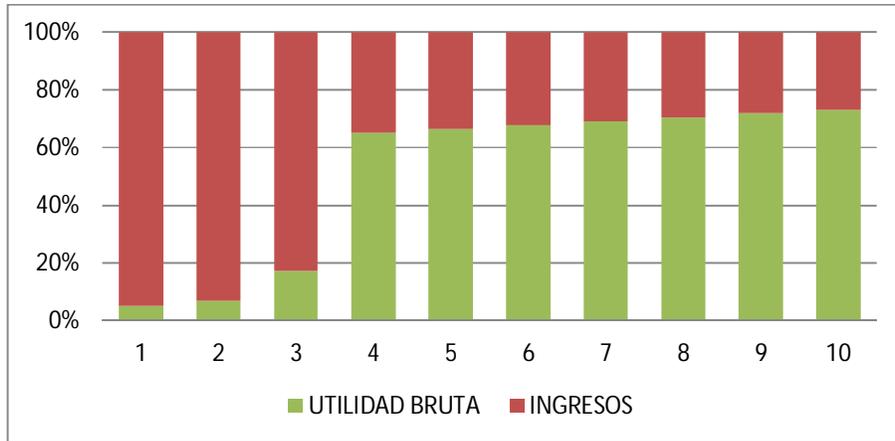
#### 4.2.6 Estado de resultados

La Tabla 4.32 presenta el estado de resultados del primer ciclo de operación de la planta de biogás, es decir, un resumen de la eficiencia con que aprovecharían los recursos provenientes de las ventas.

**Tabla 4.32 Estado de resultados para el primer año de operación**

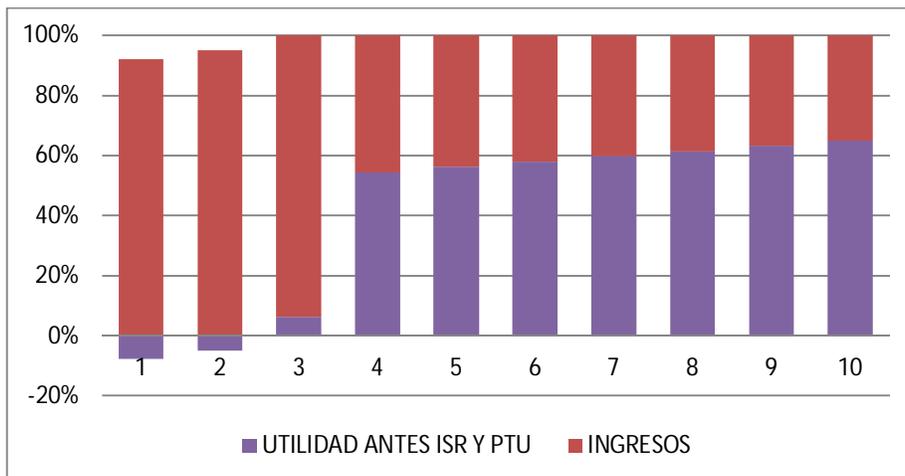
<b>ESTADO DE RESULTADOS</b>	
Primer año	Expresado en miles de pesos
<b>VENTAS</b>	\$ 26,068.1
- Deducciones a las ventas	\$ -
+ Otros ingresos	\$ -
<b>INGRESOS NETOS</b>	\$ 26,068.1
<b>Costo de lo vendido</b>	
- Materiales	\$ 3,175.5
- Mano de obra	\$ 3,110.3
- Energía Eléctrica	\$ -
- Mantenimiento	\$ 1,838.4
- Depreciaciones, amortizaciones	\$ 19,326.7
<b>UTILIDAD BRUTA</b>	-\$ 1,382.8
- Gastos Administrativos	\$ 4,146.0
- Gastos de Venta	
- Gastos Financiero	
<b>UTILIDAD ANTES ISR Y PTU</b>	-\$ 5,528.8
- ISR(30%) Y PTU(10%)	-\$ 2,211.5
<b>UTILIDAD DESPUÉS DE ISR Y PTU</b>	-\$ 3,317.3

Las Figuras 4.17-4.29 explican de mejor forma como las utilidades van creciendo conforme la vida del proyecto. Es importante destacar que la ley del impuesto sobre la renta considera una tasa de depreciación del 100% para activos que se relacionen con la generación de energías renovables, lo que significa que es posible realizar los cargos por depreciación del 80% de los activos durante el primer año de operaciones, esto tiene un efecto que pareciera negativo (pero que no lo es) en la rentabilidad del proyecto. Si se considera una tasa de 30% de depreciación para estos activos, los tres primeros años no se obtienen utilidades, pero el efecto solamente es contable, ya que en realidad el efectivo no sale de la compañía, incluso favorece el periodo de recuperación de la inversión y el análisis TIR que se muestra a continuación.

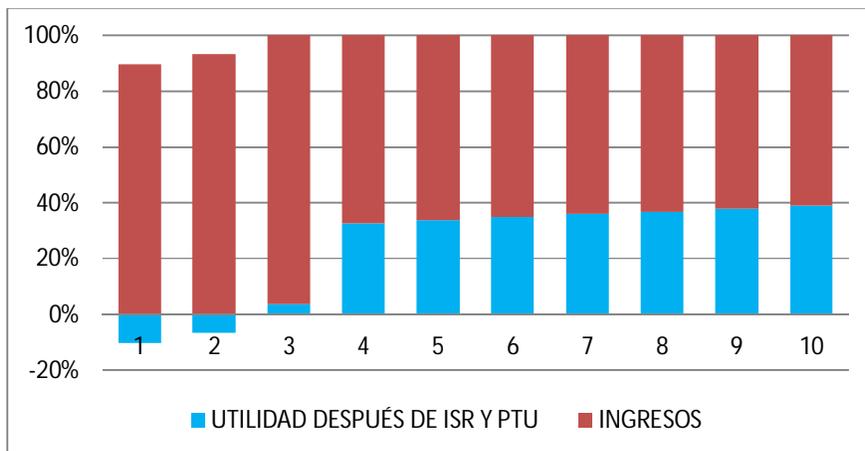


**Figura 4.17 Porcentaje que representa la utilidad bruta**

La utilidad bruta para los últimos 6 años del análisis sobrepasa el 50%, lo que habla de un buen manejo de los recursos y alta eficiencia de conversión de inversión en utilidades.



**Figura 4.18 Porcentaje que representa la utilidad antes de impuestos**



**Figura 4.19 Porcentaje que representa la utilidad neta**

#### 4.2.7 Tasa interna de retorno (TIR)

Como se ha mencionado antes, la depreciación representa un costo ficticio, de hecho se considera un flujo positivo para el proyecto como se ve en las Tablas 4.25 y 4.26, además de la reducción de la carga fiscal por la reducción de la base grabable para ISR y RUT. En este punto lo que se evalúa es en realidad el dinero que entra o sale de la empresa a lo largo del tiempo, es por esto que la TIR es una medida de rentabilidad mucho más efectiva que los índices de rentabilidad del estado de resultados. Además una buena planeación fiscal puede reducir en gran medida los impuestos a pagar presentando resultados muy bajos o incluso negativos, lo que hace completamente estéril la medida de utilidades netas en la eficiencia de la empresa.

La columna flujo neto de efectivo de las Tablas 4.33-4.34 se compone de las utilidades netas más la depreciación y es la base para el cálculo de la TIR. Este cálculo es un camino de iteraciones, trayendo los flujos de efectivo en cualquier periodo del tiempo al presente, a través de una tasa de interés, y posteriormente sumándolos para comprobar que son igual a cero. En este caso, se ha utilizado la herramienta automática de Microsoft Excel® para facilitar los cálculos y el resultado se presenta a continuación:

$$TIR = 33\%$$

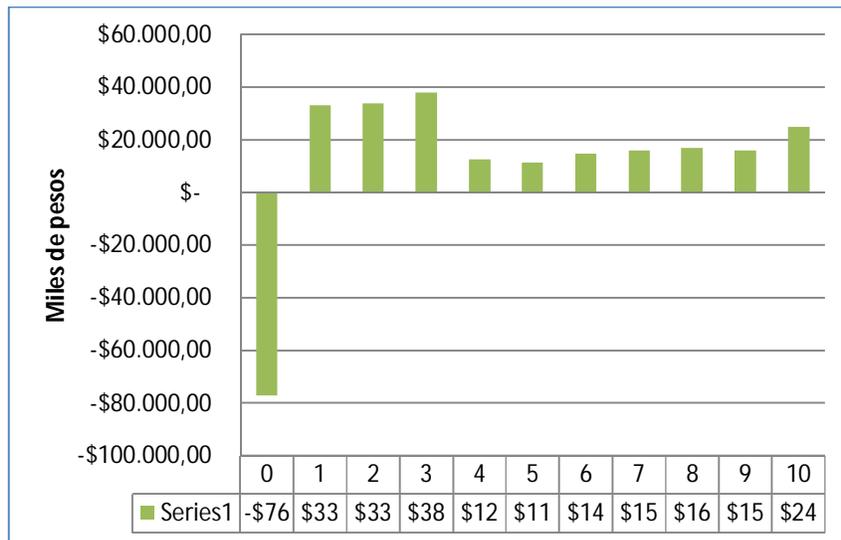
**Tabla 4.33 Primera parte del estado de flujo de efectivo**

AÑO	Inversión		Ventas anuales	Costos			Flujo de efectivo antes ISR y RUT
	Fija+dif	CT		Variables.	Fijos	Finan	
	mil\$/año	mil\$/año	mil\$/año	mil\$/año	mil\$/año	mil\$/año	mil\$/año
0	-\$ 71,966.18	-\$ 5,000.00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 76,966.18
1	\$ -	\$ -	\$ 26,068.10	-\$ 8,124.26	-\$ 4,146.00	\$ -	\$ 13,797.84
2	\$ -	\$ -	\$ 30,411.80	-\$ 11,687.18	-\$ 4,146.00	\$ -	\$ 14,578.62
3	\$ -	\$ -	\$ 34,513.43	-\$ 11,687.18	-\$ 4,146.00	\$ -	\$ 18,680.25
4	-\$ 448.60	\$ -	\$ 35,975.88	-\$ 11,687.18	-\$ 4,146.00	\$ -	\$ 19,694.10
5	-\$ 4,140.00	\$ -	\$ 37,544.86	-\$ 11,687.18	-\$ 4,146.00	\$ -	\$ 17,571.68
6	\$ -	\$ -	\$ 39,231.26	-\$ 11,687.18	-\$ 4,146.00	\$ -	\$ 23,398.08
7	\$ -	\$ -	\$ 41,047.22	-\$ 11,687.18	-\$ 4,146.00	\$ -	\$ 25,214.04
8	-\$ 448.60	\$ -	\$ 43,006.26	-\$ 11,687.18	-\$ 4,146.00	\$ -	\$ 26,724.48
9	-\$ 4,140.00	\$ -	\$ 45,123.44	-\$ 11,687.18	-\$ 4,146.00	\$ -	\$ 25,150.26
10	\$ 3,702.56	\$ 5,000.00	\$ 47,415.58	-\$ 11,687.18	-\$ 4,146.00	\$ -	\$ 40,284.96

En la Figura 4.20 se muestran los flujos de efectivo que fueron calculados en las Tablas 4.32-4.33. Estos flujos ya están descontados con una TMRA que es el siguiente punto a tratar.

**Tabla 4.34 Segunda parte del estado de flujo de efectivo**

AÑO		Ingreso Grabable	Impuestos	Flujo de efectivo despues ISR y RUT	Flujo Neto de Efectivo	VPN	Acumulado
	Depreciación						
		mil\$/año	mil\$/año	mil\$/año	mil\$/año	mil\$/año	mil\$/año
0	\$ -	\$ -	\$ -	-\$ 76,966.18	-\$ 76,966.18	-\$ 76,966.18	-\$ 76,966.18
1	-\$ 19,326.67	\$ -	\$ -	\$ 13,797.84	\$ 33,124.51	\$ 26,499.61	-\$ 50,466.58
2	-\$ 19,326.67	\$ -	\$ -	\$ 14,578.62	\$ 33,905.29	\$ 21,699.39	-\$ 28,767.19
3	-\$ 19,326.67	\$ -	\$ -	\$ 18,680.25	\$ 38,006.92	\$ 19,459.54	-\$ 9,307.65
4	-\$ 1,959.52	\$ 17,734.58	-\$ 7,093.83	\$ 10,640.75	\$ 12,600.27	\$ 5,161.07	-\$ 4,146.58
5	-\$ 1,959.52	\$ 15,612.16	-\$ 6,244.86	\$ 9,367.30	\$ 11,326.81	\$ 3,711.57	-\$ 435.01
6	-\$ 1,959.52	\$ 21,438.57	-\$ 8,575.43	\$ 12,863.14	\$ 14,822.66	\$ 3,885.67	\$ 3,450.66
7	-\$ 1,959.52	\$ 23,254.53	-\$ 9,301.81	\$ 13,952.72	\$ 15,912.23	\$ 3,337.04	\$ 6,787.70
8	-\$ 1,959.52	\$ 24,764.96	-\$ 9,905.98	\$ 14,858.98	\$ 16,818.49	\$ 2,821.67	\$ 9,609.38
9	-\$ 1,959.52	\$ 23,190.74	-\$ 9,276.30	\$ 13,914.45	\$ 15,873.96	\$ 2,130.57	\$ 11,739.94
10	-\$ 1,959.52	\$ 38,325.44	-\$ 15,330.18	\$ 22,995.27	\$ 24,954.78	\$ 2,679.50	\$ 14,419.44



**Figura 4.20 Flujos netos de efectivo del proyecto**

**4.2.8 Tasa mínima de rendimiento atractiva (TMRA)**

En México la *tasa de interés interbancario de equilibrio* TIIE es de 4.9% desde el 2009 y se espera siga rondando el 5% en los próximos años, mientras que la tasa de cetes a 336 días es de 4.85%. Los bonos de tasa fija a 10 años entregan un rendimiento de 7.16% y la tasa de inflación publicada por el Banco de México se ha mantenido por debajo del 5% en los últimos años. Aún con la desaceleración de la economía, se espera que la inflación para los siguientes 5 años se mantenga en 3%, como era la meta del Banco Central, con un intervalo de confianza de  $\pm 1\%$ .

Al empezar a estructurar la capitalización del proyecto no se cuenta con una limitación en el porcentaje y costo de las diferentes fuentes de financiamiento, de hecho se tiene que proponer y para eso se presenta la Tabla 4.35.

Una fuente de financiamiento muy adecuada para el proyecto es BANOBRAS, debido a que cuenta con un fondo específico para infraestructura y más aún para el manejo integral de los RSU, y dado que el proyecto está alineado al plan de desarrollo del municipio, será la primera fuente de la que se puede apoyar. Para poder sumar a FONADIN al proyecto, se ofrecería tomar parte de las acciones de la empresa, es decir, para un monto de 49% de la inversión total, esta institución se llevaría el mismo porcentaje en participación de utilidades. Ésta es la fuente de financiamiento más cara para el proyecto pero su capital es indispensable para que otras instituciones, como los bancos de desarrollo, se interesen en el proyecto. Al ser FONADIN una institución federal, es necesario que el municipio apoye el proyecto, por ejemplo a través de la creación de un fideicomiso, y es un objetivo alcanzable gracias a la reducción de 150 toneladas diarias de residuos sin la necesidad de que aporten efectivo y afecten su presupuesto, además de que no se cobraría por este servicio.

**Tabla 4.35 Determinación del costo de capital esperado para el proyecto**

<b>Cálculo del costo promedio ponderado de capital (CPPC)</b>					
Institución	Tipo de financiamiento	Costo de financiamiento	% esperado de financiamiento	Ponderación	
BANOBRAS (FONADIN)	Capital riesgo	20%	49%	9.8%	
BEI	Bonos de deuda	10%	40%	4.0%	
Banca de desarrollo x	Bonos de deuda	15%	11%	1.7%	
			<b>TOTAL</b>	<b>15.5%</b>	

Las bancas de desarrollo como el Banco Europeo de Inversión y BANOBRAS fijan sus programas de pago con respecto a los plazos, los flujos de efectivo generados por el proyecto, el tipo de garantías que se presenten, el riesgo comercial, el grado de innovación y TIIE prevaeciente en la región. Por ejemplo, el BEI cobra una tasa de 5 puntos por encima de la TIIE.

Entonces, la TMRA debe incluir el costo promedio ponderado de capital (CPPC) (15.5%), un aumento por la inflación (4.5%) y otro tanto más por las condiciones de riesgo que se puedan presentar (5%). En este caso se fijará en 25% y como la TIR resultante fue de 33% es válido decir que el proyecto es una alternativa de inversión rentable. Comparando el proyecto con una inversión en CETES, donde la tasa de rendimiento a 28 días es de min 4.24%-max 4.63%, se puede decir que es una alternativa mucho más atractiva.

#### **4.2.9 Valor presente neto (VPN)**

En la penúltima columna de la Tabla 4.34, se muestra el valor de los flujos descontados a valor presente para cada uno de los flujos netos de efectivo que genera el proyecto en los 10 años de evaluación. Al final la suma es de:

$$VPN = \$14,419,440.00 \text{ MXP}$$

Ésto quiere decir que el proyecto supera las expectativas de la TMRA, y se puede verificar puesto que la TIR es mayor.

#### 4.2.10 Periodo de recuperación de la inversión

En la última columna de la Tabla 4.34 se tiene el cálculo de la acumulación neta de efectivo. Lo más recomendable es realizar el cálculo con base en los flujos de efectivo descontados a valor presente, ya que ésta es la medida real de la efectividad del proyecto.

Para estimar un periodo más exacto se grafican los flujos acumulados y se determinan los periodos extremos entre los que se encuentra el cero. Dependiendo del tipo de curva que describa mejor al proyecto se puede o no utilizar una interpolación lineal o exponencial. Para este proyecto se puede considerar una variación lineal como se ve en la Figura 4.21.

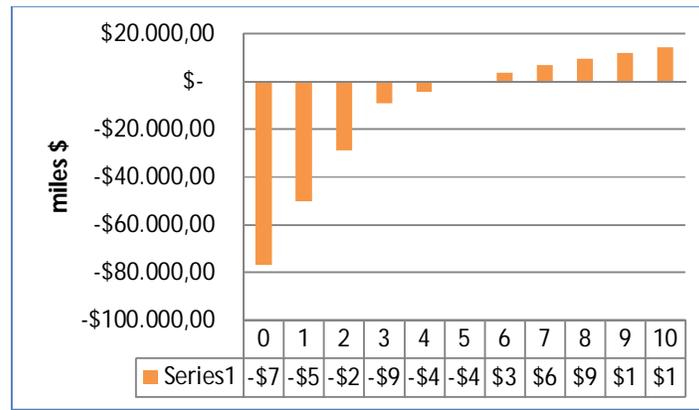


Figura 4.21 Flujo neto acumulado a valor presente

Entonces el cálculo del periodo de recuperación se realiza entre el año 5 y 6 con el siguiente modelo:

$$\text{Periodo de recuperación} = \frac{-S_t}{S_{t+1} - S_t} + t \quad (4-55)$$

Donde:  $S_t$  = flujo de efectivo en el extremo anterior

$S_{t+1}$  = flujo de efectivo en el extremo posterior

$t$  = periodo

$$\text{Periodo de recuperación} = \frac{-(435.01)}{3450.66 - (-435.01)} + 5$$

$$\text{Periodo de recuperación} = 5.11 \text{ años} = 5 \text{ años con un mes}$$

### 4.3 Pre-factibilidad ambiental

#### 4.3.1 Reducción de emisión de gases de efecto invernadero

La tabla 4.36 muestra el resumen de los cálculos que se realizaron en el punto 4.1.1.11 para contabilizar la reducción de las emisiones contaminantes en términos de CO<sub>2</sub> equivalentes.

**Tabla 4.36 Parámetros de reducción de la contaminación atmosférica**

<b>Parámetro</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidades</b>
Producción diaria de biogás	8,100.00	Nm <sup>3</sup> /d
Producción diaria de metano	4,860.00	Nm <sup>3</sup> /d
	3.47	ton/d
Densidad metano	0.714	kg/m <sup>3</sup>
Peso molecular metano	16	g/mol
Moles producidas metano	216,877.50	Mol/d
<b>Contribución en ton CO<sub>2</sub> equivalente</b>	<b>72.87</b>	<b>ton CO<sub>2</sub> e/d</b>
Producción diaria de CO <sub>2</sub> digestión	2,430.00	Nm <sup>3</sup> /d
	3.79	ton/d
Densidad CO <sub>2</sub>	1.56	kg/m <sup>3</sup>
Peso molecular CO <sub>2</sub>	44	g/mol
Moles producidas de CO <sub>2</sub>	86,154.55	Mol
<b>Contribución en ton CO<sub>2</sub> e</b>	<b>3.79</b>	<b>ton CO<sub>2</sub> e/d</b>
Equivalencia gasolina-metano	1.13	L/m <sup>3</sup>
Metano quemado en coches	2,128.35	Nm <sup>3</sup> /d
Litros de gasolina quemados actualmente	2,405.04	Nm <sup>3</sup> /d
Emisión de CO <sub>2</sub> por litro de gasolina	2.032	kgCO <sub>2</sub> /L
<b>Emisión actual CO<sub>2</sub> por gasolina</b>	<b>3.77</b>	<b>ton CO<sub>2</sub> e/d</b>
<b>Contribución total de CO<sub>2</sub> sin proyecto</b>	<b>80.43</b>	<b>ton CO<sub>2</sub> e/d</b>
Consumo metano en cogeneración	2,731.65	Nm <sup>3</sup> /d
	1.95	ton/d
Moles CH <sub>4</sub> que se queman	121,899.67	Mol
<b>Contribución en ton CO<sub>2</sub> equivalente</b>	<b>5.36</b>	<b>ton CO<sub>2</sub> e/d</b>
Metano quemado en coches	2,128.35	Nm <sup>3</sup> /d
	1.52	ton/d
Moles CH <sub>4</sub> que se queman	94,977.83	Mol
<b>Contribución en ton CO<sub>2</sub> equivalente</b>	<b>3.22</b>	<b>ton CO<sub>2</sub> e/d</b>
<b>Contribución total de CO<sub>2</sub> con proyecto</b>	<b>8.59</b>	<b>ton CO<sub>2</sub> e/d</b>
<b>Ahorro total por la implementación</b>	<b>71.84</b>	<b>ton CO<sub>2</sub> e/d</b>
<b>Ahorro anual por la implementación</b>	<b>26,222.80</b>	<b>ton CO<sub>2</sub>e/año</b>

#### 4.3.2 Reducción de la contaminación de mantos freáticos

Con el desarrollo de este proyecto se evitaría al 100% que se generara uno de los principales contaminantes de las fuentes de agua, superficiales y subterráneas, que es la lixiviación producida en los basureros a cielo abierto. La NOM-083-SEMARNAT-2003, (que establece las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial), define lixiviado como líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contienen en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representan un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos.

La causa de que se formen los lixiviados es la hidrólisis de los materiales orgánicos en donde se separa el agua contenida en los compuestos y al mezclarse con los componentes de los materiales inorgánicos puede generar una solución contaminante.

#### **4.3.3 Agua de riego**

Las prácticas de riego son las más directamente controladas por el hombre, están orientadas al manejo racional del agua, del suelo y del cultivo, teniendo como objetivo final la obtención de rendimientos económicamente rentables sin deterioro de los mismos. Por ello se menciona el otro beneficio de utilizar los reactores anaerobios, ya que se obtendrán grandes cantidades de agua gris como subproducto del sistema, ideal para utilizar como agua de riego.

El agua se puede utilizar directamente en el paisaje para el riego de árboles frutales y pastizales. El agua no es portador de bacterias patógenas, la materia orgánica y los restos de los alimentos que se encuentran en el agua aportan nutrientes para plantas y cultivos (Ludwig, 2000).

#### **4.3.4 Reducción de riesgos sanitarios**

La implementación del sistema de digestión anaerobia ayuda drásticamente a la reducción de riesgos sanitarios por eliminar en su totalidad los lixiviados que dañan al medio ambiente y a las comunidades de seres vivos cercanos (Di Mauro y col., 2000).

Por otro lado, al aprovechar los residuos orgánicos y evitar que se acumulen en lugares no adecuados, se reducen también los vectores biológicos e infecciosos que se generan con la proliferación de fauna nociva como mosquitos, moscas, ratas y perros, que se infectan o albergan microorganismos patógenos al entrar en contacto con los residuos, y los llevan a las comunidades cercanas, llegando incluso a provocar muertes. También se reducen las enfermedades transmitidas a través de la suspensión de huevecillos o partículas infectadas con microorganismos en las corrientes de aire.

#### **4.3.5 Reciclaje**

El reciclaje es la obtención de materias primas a partir de desechos, introduciéndolos de nuevo en los diferentes sectores manufactureros e industriales y se produce ante la perspectiva del agotamiento de recursos naturales y para eliminar de forma eficaz los desechos.

El reciclaje de residuos inorgánicos es muy común en varios países y en México se realiza gracias a los pepenadores; sin embargo, reciclar los desperdicios orgánicos requiere algo más que sólo juntarlos y venderlos, incluso al realizar un tratamiento aerobio se necesitan equipos especializados y esto se traduce en inversión.

El sistema anaerobio es el ejemplo claro del potencial del reciclaje, ya que, basado en un proceso de degradación que se da en forma espontánea en la naturaleza, cierra completamente el ciclo de la biomasa pues permite aprovechar la energía contenida, libera el agua en forma de humedad y remineraliza los nutrientes para que lleguen a los cultivos de tal forma que las plantas puedan utilizarlos para la generación de nuevos alimentos, sin la necesidad de utilizar fertilizantes químicos artificiales que degraden los suelos.

Al final, prácticamente se puede reciclar el total de la materia orgánica, algo que es impensable con los materiales inorgánicos recuperados ya que la gran barrera que existe

es que no todos estos materiales tienen un mercado y los procesos existentes para su transformación son demasiado costosos.

#### 4.4 Pre-factibilidad Social

Sería muy interesante, desde el punto de vista del inversionista de impacto social, medir en términos económicos todos los beneficios que se generen por la implementación de un proyecto; sin embargo, esto no es nada sencillo y requiere de la participación de profesionales de las ciencias sociales. Aun así, a continuación se presentan algunos indicadores, a los que se sometió la propuesta, diferentes a los presentados en la pre-factibilidad económica.

##### 4.4.1 Índice beneficio-coste

Un beneficio social, que puede traducirse fácilmente en económico, y es muy importante para el municipio en donde se plantea la propuesta, es el de la reducción de las toneladas de residuos que llegarían a relleno sanitario. En México, la disposición correcta de una tonelada de residuos sólidos urbanos no peligrosos cuesta a los municipios entre \$120 y \$150, en promedio \$135 por lo que la reducción anual de 54,750 ton por la implementación del proyecto representa \$7,391,250.00 MXP como beneficio municipal directo. Si se trasladan a valor presente estos nuevos flujos de efectivo, se suman y se añaden a los VPN generados por la operación del proyecto, es posible calcular el índice B/C de la siguiente manera:

$$I_{B/C} = \frac{\$26,390,000.00 + \$91,385,630.00}{\$76,966,180.00} = 1.53$$

Como el índice B/C es mayor que 1, el proyecto debe ser emprendido y puede ser presentado ante el municipio para obtener el apoyo político y legal del mismo.

##### 4.4.2 Justificación del proyecto y beneficios sociales

Para justificar la implementación o rechazo del proyecto, se enlistan los principales beneficios sociales que se derivarían, y que no fueron traducidos en términos económicos, con la intención de que sirvan como apoyo en la toma de una decisión al comparar esta iniciativa con alguna otra que genere resultados económicos similares.

1. *Generación de empleos directos.* De acuerdo a lo mostrado en las Tablas 4.23 y 4.27, se generarían 36 puestos operativos y 15 puestos administrativos. Los sueldos y salarios se definieron con respecto a un análisis comparativo en algunas de las bolsas de trabajo en línea más importantes y están bien diferenciados de acuerdo al perfil laboral que se requiere.
2. *Los empleos indirectos* que se generan no se contabilizaron pero siempre que se realiza una inversión de tales magnitudes hay una derrama económica que genera riqueza y más negocios.
3. *Personas beneficiadas.* Dado que la tasa de generación de residuos per cápita en la región es de 1 kg/hab, el hecho de tratar 150,000 kg diario es equivalente a cubrir un servicio para 150,000 personas.
4. *Mejora de la imagen urbana.* Algunas regiones, turísticas como Veracruz, gastan miles de pesos mensualmente por cuidar la imagen urbana y el último de los frutos que se citará por el desarrollo de esta propuesta es el apoyo que generaría en este sentido, sobre todo cuando está tan en boga y es tan indispensable incluir dentro de las políticas de acción de un lugar el eje de sostenibilidad ambiental y social.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

Con respecto al objetivo general de este trabajo, es posible decir que la evaluación a nivel pre-factibilidad resultó satisfactoria.

A nivel técnico, con una entrada diaria de 150 ton de residuos orgánicos, degradadas en dos reactores en condiciones termofílicas de 55°C, a 15 días de tiempo de retención, diseñados para mantener una COV de 2.75 kg MV/m<sup>3</sup>, se conseguiría una producción de 8,100 Nm<sup>3</sup> de biogás lo que permitiría cubrir completamente la demanda eléctrica pico de 372.2 kWe y la demanda térmica de 495 kWt, a través del uso de un sistema de cogeneración modelo HCP 400 B con motor PASCH.

Entre los objetivos secundarios se encontraba, el proponer los procesos necesarios para utilizar el biogás como combustible vehicular y derivado de la investigación, se puede decir que es posible hacerlo, ya que existen los filtros necesarios para generar una pureza de 99% de metano, a partir de biogás generado en la descomposición de la fracción orgánica de los residuos domiciliarios y por otro lado, existen desde hace varias décadas los sistemas de conversión que necesitan los automotores para poder quemar este combustible sin afectar las prestaciones especificadas por el fabricante.

Con excedentes de 1,642.35 m<sup>3</sup>/día de metano, es posible implementar un sistema de compresión y abastecimiento de gas vehicular, para poder llevar el metano purificado hasta los vehículos, con la intención de sustituir 1,855.86 L/día de gasolina o diésel y reducir aproximadamente 200 ton de CO<sub>2</sub> e/año por este cambio de combustible.

Por otro lado, se evaluó la aplicación de varias tecnologías para acondicionar los lodos digeridos y aprovechar esta humedad para la dilución e inoculación de los residuos a tratar. Gracias a la extracción del agua, es posible pensar en la aplicación de los nutrientes que contendrían los lodos como abono para el mejoramiento de los suelos y la producción de nuevos alimentos, lo que cerraría el ciclo de la biomasa y reduciría la utilización excesiva de fertilizantes químicos, responsables de la degradación de los campos por el inminente agotamiento de la materia orgánica en ellos, la incertidumbre generalizada en los precios por las variaciones en el costo del petróleo del que dependen, la contaminación a las fuentes de agua, con fenómenos como la eutrofización, y a la atmósfera por la liberación de óxido nitroso (296 veces más nocivo que el CO<sub>2</sub>).

Desde el punto de vista ambiental, el proyecto también resulta muy atractivo ya que evitaría que se liberaran 26,223 ton CO<sub>2</sub>e cada año, evitaría también que se generaran lixiviados en los tiraderos a cielo abierto con los que cuenta el puerto, promovería y facilitaría el reciclaje de materiales inorgánicos en la región, reduciría la contaminación de los suelos y minimizaría la cantidad de espacio que se destina cada año a la disposición de desperdicios lo que se traduce en ahorros económicos y una disminución de la creciente huella ambiental.

Para medir la viabilidad financiera de este proyecto, se verificó la tasa interna de retorno (33%) y se comparó con una tasa media de rendimiento atractiva de 25%; los resultados fueron alentadores, ya que gracias a que la primera tasa es mayor, el periodo de recuperación (5 años aproximadamente) de la inversión es menor que la vida útil del proyecto o dicho de otra forma, a pesar de todos los egresos y el pago simultáneo de la inversión, el proyecto genera un flujo de efectivo neto positivo.

La inversión inicial es elevada, por lo que las fuentes de financiamiento disponibles para el proyecto parecerían limitadas, sin embargo, en México existen múltiples bancos de desarrollo y fideicomisos cuya finalidad es financiar este tipo de iniciativas, como el Banco Nacional de Obras y Servicios, el Banco Interamericano de Desarrollo, el Banco Europeo, Bancomext, Financiera Rural, FIRCO y FIDE, además de fondos de inversión de capital emprendedor como Water-Capital, el Fondo Mexicano del Carbono, Adobe Capital o Greentek Ventures y fondos institucionales como el Fondo de Sustentabilidad de CONACYT, y la idea es valerse de éstos apoyos ya que será difícil que el presupuesto del municipio por sí mismo pueda materializar el proyecto.

Desde el punto de vista social también se obtienen algunos parámetros interesantes como la generación de 51 empleos directos de rangos operativos y administrativos, que incrementarían la población económicamente activa (PEA) del municipio y generarían ingresos para sus familias, que al ejercer sus gastos, ayudarían a mantener las actividades económicas y generarían más empleos en forma indirecta.

El proyecto beneficiaría a un aproximado de 150 mil personas lo que generaría una alta rentabilidad social y política para la administración municipal actual; además de mejorar la imagen urbana, lo que ayudaría a recuperar el turismo y promovería actividades deportivas y culturales.

Finalmente, en un intento por cuantificar la pre-factibilidad social de esta propuesta, se determinó el índice beneficio-costos que resultó ser de 1.53, lo que significaría que de acuerdo con todas las externalidades, tanto positivas como negativas, el resultado global de invertir en el proyecto sería beneficioso a la sociedad.

## **5.2 Discusión y recomendaciones**

Dentro de los alcances de este trabajo, no se encontraba la elaboración de un estudio de mercado lo suficientemente exhaustivo como para sustentar una evaluación de factibilidad y debido a esto, el análisis financiero arroja valores que deben ser revisados después de realizar las proyecciones de ventas. Aun así, las suposiciones que se presentaron, arrojaron una tasa interna de 33% para 10 años, que brinda la certeza suficiente para que se continúe con los estudios de ingeniería de detalle, se desarrolle el proyecto ejecutivo y se generen las corridas financieras correspondientes.

En general, desde el punto de vista técnico es posible desarrollar el proyecto. Existen empresas con muchos años de experiencia en la construcción de lagunas de digestión y estaciones de depuración de aguas residuales, sistemas de cogeneración y estaciones de servicio para gas natural vehicular, y de generarse el plan de negocios correspondiente, se puede seguir un esquema de subcontratación para generar la ingeniería completa del proyecto.

Debe advertirse también, que los parámetros que se utilizaron para el diseño básico de los procesos surgieron del estado de la técnica mundial, ya que las fuentes principales fueron publicaciones de investigadores en distintas naciones y las características de los residuos son tan heterogéneas que para poder establecer especificaciones más precisas habrá que montar una planta piloto, que deberá ser diseñada y presupuestada de acuerdo a metodologías que no se han revisado en este trabajo.

Hay que advertir a los lectores, que en más de una ocasión, para poder entender los procedimientos de cálculo y los principios de funcionamiento de algunos equipos, es necesario tener una formación profesional en el área de las ciencias físico-matemáticas y no fue posible explicar con mayor detalle todos los razonamientos, metodologías y

conclusiones a partir de los cuales se definieron ciertas proyecciones, estimaciones, factores de seguridad; sin embargo, se trató al menos, de incluir dentro de las referencias un vínculo directo a la información general.

En México, entre las actividades que más contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero están la quema de combustibles fósiles para la generación de energía, el transporte y la degradación de los residuos orgánicos, así como la agricultura intensiva con el uso de fertilizantes químicos. La gran ventaja de aplicar el tratamiento anaerobio a la fracción orgánica de los residuos, es que los subproductos que se generan contribuirían en todos estos sectores, frente a tecnologías emergentes, como la gasificación por plasma, que se enfocan en la generación de energía y no tienen un impacto tan integral en otros rubros.

Finalmente, en este momento, el mundo se encuentra ante una revolución; a diario se habla de los problemas que está causando el calentamiento global: De las muertes, de los desastres naturales, de las especies en peligro, de las comunidades marginadas, de las irresponsabilidades que se cometen y de múltiples cuestiones negativas, pero también se habla de las propuestas, proyectos y movimientos de los diferentes sectores: Iniciativas, incentivos y reformas de ley, por parte de gobiernos; desarrollos científicos, tecnológicos y proyectos de inversión para mejoras ambientales en procesos o infraestructura, por parte de las empresas e institutos de investigación; así como protestas, movimientos e ideas generadas por la sociedad en general. En realidad nos encontramos en el momento adecuado para hacer algo por nuestro mundo, de avanzar hacia una revolución industrial limpia y este tipo de proyectos corresponden al compromiso de la comunidad universitaria, y en particular de los egresados de las carreras de ingeniería, para con la sociedad mexicana, a la que deben su educación, y para con el mundo al que se le debe profesar cariño y respeto profundo.

## REFERENCIAS

ADA, 2008. Biogas Methane Explained & other articles. Publicación de la Anaerobic Digestion Association. Londres, Inglaterra.

AMPV, 2008. Plan Municipal de Desarrollo 2008- 2011 del Municipio de Veracruz. Publicado por el H. Ayuntamiento Municipal del Puerto de Veracruz. Puerto de Veracruz, Veracruz, México.

Arvizu, J. 2010. La basura como recurso energético: Situación actual y prospectiva en México. *Revista Ingeniería Civil*. 46(8):22-23

ASPRO, 2010. Aspro: Líder en el ramo del GNC. Catálogo de productos de la empresa Aspro. Buenos Aires, Argentina.

Ávila, J. 2001. El mercado de los fertilizantes en México: Situación actual y perspectivas. *Problemas del desarrollo*. 32(127):15-16

Bolzonella, D., Battistoni, P., Susinii, C. y Cecchi, F. 2006. Anaerobic codigestion of waste activated sludge and OFMSW: The experiences of Viarregio and Treviso plants. *Water Science and Technology*. 53(8):203-211.

BUN-CA, 2002. Manuales sobre Energía Renovable: Biomasa. Publicación de la Fundación Red de Energía. San José, Costa Rica.

Capela, I., Rodríguez, A., Silva, F., Nadais, H. y Arroja, L. 2008. Impact of industrial sludge and cattle manure on anaerobic digestion of the OFMSW under mesophilic conditions. *Biomass and Bioenergy*. 32(3):245-251.

CEPIS, 1996. Fundamentos Básicos para el diseño de digestores Anaerobios Rurales. Publicación del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, Perú.

CEPIS, 2005a. Especificaciones técnicas para la construcción de desarenadores y sedimentadores. Publicación del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, Perú.

CEPIS, 2005b. Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores. Publicación del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, Perú.

CEPIS, 2005c. Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Publicación del Centro Panamericano de Ingeniería y Ciencias del Ambiente. Lima, Perú.

CETER, 2005. Métodos económicos y ecológicamente viables para purificar gases contaminantes. Publicación del Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables. La Habana, Cuba.

Cheremisinoff, N. 2003. Handbook of Solid Waste Management and Waste Minimization Technologies. Editorial Butterworth-Heinemann. Burlington, Reino Unido.

CICC, 2007. Estrategia Nacional de Cambio Climático. Publicación de la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. México, D.F., México.

CIWMB, 2008. Current anaerobic digestion technologies used for treatment of municipal organic solid waste. Publicación del California Integrated Waste Management Board. California, Estados Unidos de América.

CMM, 2008. Cambio climático y seguridad nacional. Publicación del Centro Mario Molina. Ciudad de México, México.

- CNF, 2007. Reporte semanal de resultados de incendios forestales. Publicación de la Comisión Nacional Forestal. México, D.F., México.
- COMAIZ, 2010. Envasadoras electrónicas. Publicación de la empresa Comercializadora Mexicana de Granos S.A. Querétaro, México.
- CONAGUA, 2008. Monitor de sequía de América del Norte. Publicación de Comisión Nacional del Agua. México, D.F., México.
- CONUEE, 2010a. Portal de indicadores de eficiencia energética y emisiones vehiculares. Publicación de la Comisión Nacional por el Uso Eficiente de la Energía. México, D.F., México.
- CONUEE, 2010b. Energía de la Biomasa. Publicación de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. México, D.F., México.
- Converti, A., Lodi, A., Tortarolo, G., Nicoletta, C. y Del Borgui, M. 1995. Anaerobic digestion of the vegetable fraction of municipal refuses: Mesophilic vs termophilic conditions. *Bioprocess Engineering* 21(4):371-376.
- Coss Bu, R. 2008. Análisis y evaluación de proyectos de inversión. Editorial Limusa. Segunda Edición. México, D.F., México.
- CQ, 2009. Aguas residuales, municipales e industriales. Publicación de la empresa Cinética Química S.A. Monterrey, Nuevo León, México.
- Degan, R., Traversi, D., Acri, M., y Gilli, G. 2010. The influence of increased concentration of total solids on the performance of co-digestion process of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW) and activated sludges. En: Proceedings Venice 2010, Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste. Venecia, Italia.
- De Baere, L. 1999. Anaerobic digestion of solid waste: State of the art. En: Proceedings of the Second International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Wastes. International Association Water Quality. Vol. 1 páginas 290-299. Barcelona, España.
- De Baere, L. 2006. Will anaerobic digestion of solid waste survive in the future?. *Water Science and Technology* 53(8):187-194.
- De Baere, L. y Mattheeuws, B. 2004. Overview of Anaerobic Digesters in Europe. *BioCycle Energy* 51(2):24-25.
- De la Fuente, D. y Pino, R. 2000. Teoría de líneas de espera: Modelos de colas. Publicado por la Universidad de Oviedo. Primera Edición. Oviedo, España.
- Di Mauro, C., Hoogerwerf, M. y Sinke, A. 2000. A GIS-based risk assessment model: Application on sites contaminated by chlorinated solvents and petroleum hydrocarbons (BTEX). En: 4<sup>th</sup> International Conference on integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs. Banff, Alberta, Canadá.
- Di Palma, L., Medici, F., Murto, M. y Petrucci, E. 1999. Optimizing gas production in the anaerobic co-digestion of the organic fraction of solid waste from markets. En: Proceedings of the Second International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Wastes. Barcelona, España.
- DIM, 2010. Tornillos sin fin y transporte. Publicación del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid. Madrid, España.
- Edwards, R., Larivé, J., Mahieu, V. y Rouveiolles, P. 2006. Well to wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Reporte realizado por el European Council for Automotive (EUCAR), The Oil Companies European Association for Environment, Health and Safety in Refining and Distribution (CONCAWE) y el Institute for Environment and Sustainability of the European Commission. Bruselas, Bélgica.

- ENGVA, 2008. Is the methane gas really a credible alternative in the road transport sector?. Publicación de la European Natural Gas Vehicule Association. Kruisweg, Holanda.
- EPA, 1987. Design manual of dewatering municipal solid wastes. Publicación de la Environmental Protection Agency. Washington, Estados Unidos de América.
- Ferré, A. y Fuchs, G. 2009. Draft demonstration report on fuel stations including deployment strategies and regulatory requirements. Publicación de la European Commission. Berné, Suiza.
- FLUIDICA, 2011. Plantas seleccionadoras de residuos sólidos urbanos. Publicación de la empresa FLUIDICA. Estado de México, México.
- Finstein, M. y Zadik, Y. 2009. Integrated materials and energy recovery from municipal solid waste. *BioCycle Energy*. 49(41):52.
- FIRA, 2009. El mercado de los fertilizantes en México: Situación actual y perspectivas. Publicación de Fideicomisos Instituidos con Relación a la Agricultura. México, D.F., México.
- Fricke, K., Santen, H. y Wallman, R. 2005. Comparison of selected aerobic and anaerobic of procedures for MSW treatment. *Waste Management*. 25(8):799-810.
- Gray, F. 2005. Water Technology: An Introduction for Environmental Scientist and Engineers. Publicado por Elsevier Science & Technology. Segunda Edición. Burlington, Reino Unido.
- GTZ, 2003. La basura en el Limbo: Desempeño de Gobiernos Locales y Participación Privada en el Manejo de Residuos Urbanos. Publicación de la Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México, D.F., México.
- GTZ, 2006. Guía para la elaboración de programas municipales para la prevención y gestión integral de los residuos sólidos urbanos. Publicación de la Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). México, D.F., México.
- Haines, R. 2005. BTA benefits biowaste. *Waste Management World*. 3:38-44.
- Hartmann, H. y Ahring, K. 2006. Strategies for the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: An overview. *Water Sci. and Technology*. 53(8):7-22.
- Hickman, W. 1976. Storage and retrieval of prepared refuse. En: Proceedings ASME. Waste Process Conference. Boston, Estados Unidos de América.
- Hollebeak, B. 2005. Today's Technician: Automotive fuels and emissions. Thomson Delmar Learning. Nueva York, Estados Unidos de América.
- Incropera, F. y De Witt, D. 1999. Fundamentos de transferencia de calor. Editorial Pearson Education Prentice Hall. Cuarta Edición. México, D.F., México.
- INE, 2007. Proyecto Scolel Té: La participación de comunidades rurales en el mercado internacional de venta de carbono. Publicación del Instituto Nacional de Ecología. México.
- INEGI, 2005. Estadísticas a propósito del día mundial del medio ambiente. Publicación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, D.F., México.
- IPCC, 1996. Tecnologías, Políticas y Medidas para mitigar el Cambio Climático. Publicación del Intergovernmental Panel on Climate Change. Génova, Suiza.
- Juanga, J., Visvanathan, C. y Tränkler, J. 2007. Optimization of anaerobic digestion of municipal solid waste in combined process and sequential staging. *Waste Management and Research*. 25(1):30-38.

Kauzmann, W. 1970. Kinetic Theory of Gases. Editorial Reverté. Primera Edición. Barcelona, España.

Kirk, R. y Othmer, R. 2007. Encyclopedia of chemical technology. Vol. 2. Editorial John Wiley & Sons Inc. Quinta Edición. New Jersey, Estados Unidos de América.

Llaneza, H., Moris, A., González, A. y González, E. 2010. Estudio de viabilidad de sistemas de purificación y aprovechamiento de biogás. Capítulo 1: Caracterización, purificación y control de biogás. Publicación de PSE-PROBIOGAS Desarrollo de Sistemas Sostenibles de Producción y Uso de Biogás Agroindustrial en España y del Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España. Oviedo, España.

López, J., Pereira, J. y Rodríguez, R. 1980. Eliminación de los residuos sólidos urbanos. Editores Técnicos Asociados S.A. P.128. Valencia, España.

Lothar, M. 1985. Acondicionamiento y desaguado: Filtraciones al vacío, Filtro-prensa, lechos de secado. Publicación de la Compañía Estatal de Tecnología de Saneamiento del Medio Ambiente (CETESB). Sao Paulo, Brasil.

Mata-Alvarez J., Lladrés, P., Cecchi, F. y Pavan, P. 1992. Anaerobic digestion of the Barcelona central food market organic waste: Experimental study. *Bioresource Technology*. 39(1):39-48.

Matic, D. 2006. Global opportunities for Natural Gas as a Transportation Fuel for today and tomorrow. Report on study group 5.3. International Gas Union. Instituto de Energía. Hrvoje Pojar, Croacia.

Medina, J. y Jiménez, I. 2001. Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales. Publicación del Instituto Nacional de Ecología. México, D.F., México.

Meredith, J. 1999. Administración de las operaciones: Un énfasis conceptual. Editorial Limusa. Segunda Edición. México.

Miravete, A. y Larrodé, E. 1996. Transportadores y elevadores. Editado por Reverté. Primera Edición. Barcelona, España.

Moncayo, G. 2008. Manual práctico de diseño: Dimensionamiento, diseño y construcción de plantas de biodigestión y plantas de biogás. Manual Práctico de Diseño de Aguas Residuales. Berating Ingenieure. Segunda Edición. Uelsen, Alemania.

Monroy, H., Famá, G., Meráz, M., Montoya, L. y Macarie, H. 1998. Digestión anaerobia en México: Estado de la tecnología. *Ingeniería y ciencias ambientales*. 39(10):12-23.

Muñoz, D. 2009. Administración de operaciones. Enfoque de administración de procesos de negocios. Editado por Cengage Learning. Primera Edición. México, D.F., México.

Murphy, J. y McKeogh, E. 2004. Technical, economic and environmental analysis of energy production of municipal solid waste. *Renewable Energy*. 29(7):1043-1057.

OCDE, 2008. Indicadores Ambientales: Jornadas para el Desarrollo Sustentable. Publicación de la Organización para Cooperación y Desarrollo Económico. Costa Rica.

Oleszkiewicz, J. y Poggi-Varaldo, G. 1998. High solids anaerobic digestion of mixed industrial and municipal waste and sewage sludge. *Journal of Environmental Engineering*. 124(10):10-32.

Ostrem, K. 2004. Greening waste: Anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes. Tesis para obtener el título de Maestría en Ingeniería en Recursos de la Tierra. Universidad de Columbia. Estados Unidos de América.

Palmowski, L. y Muller, J. 2000 Influence of the size reduction of organic waste on their anaerobic digestion. *Water Science and Technology*. 47(12):231-238.

- Peres, C., Sanchez, R., Matumoto, C. y Schmidell, W. 1992. Anaerobic biodegradability of the organic component of municipal solid waste (OFMSW). *Water Science and Technology*. 25(7):285-293.
- Pfeffer, J. y Khan, K. 1976. Microbial production of methane from municipal refuse. *Biotechnology and Bioengineering*. 18(9):1179-1191.
- Ramalho, S. 1996. Tratamiento de aguas residuales. Editorial Reverté. Segunda Edición. Québec, Canadá.
- SAGARPA, 2007. Tecnologías de mitigación. Publicación de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F., México.
- SAGARPA, 2009. Abonos Orgánicos. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F., México.
- SAGARPA, 2010. Proyecciones para el sector agropecuario de México: Escenario base 2009-2018. Publicación de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación en coordinación con la Subsecretaría de fomento a los agronegocios. Ciudad de México, México.
- Sapag, N. y Sapag, R. 1991. Preparación y Evaluación de Proyectos. Editorial McGraw Hill. Segunda Edición. México, D.F., México.
- SEDESOL, 2005. El manejo de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial en México. Publicación de la Secretaría de Desarrollo Social. México, D.F., México.
- SEGEM, 2002. Alternativas de Rellenos Sanitarios: Guía de toma de decisión. Publicación de la Secretaría de ecología del Estado de México. Estado de México, México.
- SEGEM, 2003. Guía para el desarrollo, presentación y ejecución de proyectos ejecutivos para rellenos sanitarios. Publicación de la Secretaría de Ecología del Estado de México. Estado de México, México.
- SEMARNAT, 2002. Guía para la presentación de la manifestación de impacto ambiental del sector eléctrico. Modalidad: Particular. Publicación de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- SEMARNAT, 2005. Informe de la situación del Medio Ambiente en México: Compendio de Estadísticas Ambientales. Publicación de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., México.
- SEMARNAT, 2008a. Informe de la situación del Medio Ambiente en México: Compendio de Estadísticas Ambientales. Publicación de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., México.
- SEMARNAT, 2008b. Informe sobre la situación ambiental: Residuos. Publicación de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., México.
- SEMARNAT, 2009. Cambio Climático. Ciencia, evidencia y acciones. Publicación de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., México.
- SEMARNAT, 2010. El medio ambiente en números: Selección de estadísticas ambientales para consulta rápida. Publicación de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F., México.
- SEMARNAT-INE, 2006. Diagnóstico Básico para la Prevención y Gestión Integral de Residuos. Publicación de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en colaboración con el Instituto Nacional de Ecología. México, D.F., México.

SENER, 2007. Prospectiva del mercado del gas natural 2007-2016. Publicación de la Secretaría de Energía. México, D.F., México.

SIAP, 2008. Resumen de la Producción Agrícola por Estado. Publicación del Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). México.

Silva, J. 1999. El gas en automoción: Coches a todo gas. Publicación en gas natural FENOSA. Barcelona, España.

SMMAALC, 2000. Alternativas de gestión de residuos sólidos industriales de la Ciudad de Montevideo. Publicación del Secretariado de Manejo del Medio Ambiente para América Latina y el Caribe. Montevideo, Uruguay.

SMN, 2008. Resumen de la temporada de ciclones tropicales. Publicación del Servicio Meteorológico Nacional. México, D.F., México.

Speece, R. 1983. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. Publicación de la Universidad de Vanderbilt. Nashville, Tennessee, Estados Unidos de América.

Sundararajan, R., Jayanthi, S. y Elango, R. 1997. Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste and domestic sewage of Coimbatore. *Indian Journal of Environmental Health*. 39(3):193-196.

SSI, 2011. M100 Dual-Shear Brochure Model. Publicación de la empresa Shredding Systems Inc. Portland, Estados Unidos de América.

Tarquin, A. y Blank, L. 2006. Ingeniería económica. Editorial McGraw Hill. Sexta Edición. México, D.F., México.

UNEP, 2009. Developing integrated solid waste management plan. Vol. 2: Assessment of current waste management system and gaps therein. Publicación del United Nations Environment Program. Editada por el Industry and Economics International Environmental Technology Centre. Osaka, Japón.

Widman, F., Herrera, F. y Cabañas, D. 2005. El uso de compost proveniente de residuos sólidos municipales como mejorador de suelos para cultivos en Yucatán: Estudios Preliminares. *Revista Ingeniería*. 9(3):31-38.