



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO DE LA APLICABILIDAD DEL MECANISMO DE  
DESARROLLO LIMPIO DEL PROTOCOLO DE KYOTO A LA  
GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD CON BASE A BIOGÁS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

P R E S E N T A N :

EMMANUELL GUTIÉRREZ GONZÁLEZ

JAVIER LABASTIDA ALVARADO

DIRECTOR DE TESIS: DR. ARTURO REINKING CEJUDO



MÉXICO D.F.

2005

m. 352201



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

## *Agradecimientos*

*A Dios por haberme dado la vida, salud y una excelente familia y amigos.*

*A mi familia: mi papá Juan, mi mamá Socorro y a mis hermanas Marysol y Lilita que siempre me han apoyado, dado cariño, amor y comprensión, los amo.*

*A mi novia Dorita, que ha sido y es una persona muy importante de mi vida, que ha estado a mi lado y nunca fallado, y siempre me ha subido los ánimos. Te amo preciosa.*

*A todos mis amigos sin excepción, que siempre me han ayudado en todo lo que les ha sido posible, que hemos pasado grandes y muy buenos momentos, se los agradezco mucho, saben que cuentan conmigo.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por haberme dado los conocimientos y herramientas para afrontar la vida.*

*Al Doctor Arturo Reinking Cejudo, por habernos apoyado en la elaboración de esta tesis.*

*Emmanuel Gutiérrez González*

## *AGRADECIMIENTOS*

*A mi mamá y a mi papá, quienes me han sabido guiar y me han dado su apoyo para seguir adelante.*

*A mis hermanos Goyo, Mónica y Miriam por su ejemplo y estar siempre conmigo.*

*Al Dr. Arturo Reinking Cejudo por su gran apoyo y sus consejos para la realización de este trabajo y en mis estudios.*

*A Emmanuell por ser un valioso compañero y amigo durante la carrera, así como en la elaboración de este trabajo.*

*A mis amigos y compañeros por todos esos buenos momentos inolvidables.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por darme la mejor educación.*

*Y a Dios por permitirme estar aquí.*

*Javier Labastida Alvarado*

**Lista de Acrónimos.**

AND	Autoridad Nacional Designada.
BAU	Business As Usual
CAPM	Capital Asset Pricing Model.
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
COP	Conferencia de las Partes.
DDP	Documento de Diseño del proyecto.
EOD	Entidad Operacional Designa.
EPA	Environmental Protection Agency.
FPC	Fondo Prototipo Carbono.
GEI	Gases de Efecto Invernadero.
GRS	Gas de Relleno Sanitario.
HT	Alta Tensión.
ISR	Impuesto Sobre la Renta.
JÉ	Junta Ejecutiva.
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio.
OSACT	Órgano Subsidiario de Asesoramiento Científico y Tecnológico.
OSE	Órgano Subsidiario de Ejecución.
O&M	Operación y Mantenimiento.
PCG	Potencial de Calentamiento Global.
PICC	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático.
PP	Participantes del Proyecto.
RCE	Reducciones Certificadas de Emisiones.
RP	Reunión de las Partes.
SIMEPRODESO	Sistema Metropolitano de Procesamiento de Desechos Sólidos.
TIR	Tasa Interna de Retorno.
VF	Valor Futuro.
VPN	Valor Presente Neto.
WACC	Weighted Average Cost of Capital.

**Lista de Figuras.**

	<i>Página</i>	
<i>Figura 1.1</i>	<i>Efecto Invernadero.</i>	5
<i>Figura 3.1</i>	<i>Esquema sobre la Adicionalidad de un Proyecto.</i>	23
<i>Figura 3.2</i>	<i>Pruebas de la Adicionalidad de proyectos MDL.</i>	25
<i>Figura 3.3</i>	<i>Diagrama de las fases y los actores del ciclo del proyecto de MDL.</i>	28
<i>Figura 4.1</i>	<i>Metodología para caracterizar un sitio con base en su potencial de producción de GRS</i>	42
<i>Figura 4.2</i>	<i>Producción de GRS incrementa y luego disminuye.</i>	43
<i>Figura 4.3</i>	<i>Ejemplo de Curvas de Generación de Gas de Relleno Sanitario.</i>	47
<i>Figura 4.4</i>	<i>Fases que ocurren en la generación de GRS.</i>	49
<i>Figura 4.5</i>	<i>Relación entre la eficiencia de un sistema de recolección del GRS y su costo.</i>	56
<i>Figura 4.6</i>	<i>Esquema típico de un pozo de extracción del GRS.</i>	57
<i>Figura 4.7</i>	<i>Esquema típico de un canal o zanja horizontal de recolección del GRS.</i>	58
<i>Figura 4.8</i>	<i>Esquema típico de un canal o zanja horizontal de recolección del GRS.</i>	59
<i>Figura 4.9</i>	<i>Configuración tipo "espina de pescado" de una tubería de recolección de GRS.</i>	61
<i>Figura 4.10</i>	<i>Configuración tipo "colector anular" de una tubería de recolección de GRS.</i>	61
<i>Figura 4.11</i>	<i>Antorcha de cilindro cerrado.</i>	65
<i>Figura 4.12</i>	<i>Ejemplo de motogenerador.</i>	68
<i>Figura 5.1</i>	<i>Gráfica de Tarifa de Energía Eléctrica VPN.</i>	95
<i>Figura 5.2</i>	<i>Gráfica de Tarifa de Energía Eléctrica TIR.</i>	95
<i>Figura 5.3</i>	<i>Gráfica de Apalancamiento VPN.</i>	96
<i>Figura 5.4</i>	<i>Gráfica de Apalancamiento TIR.</i>	96
<i>Figura 5.5</i>	<i>Gráfica de Tasa de Descuento VPN.</i>	97
<i>Figura 5.6</i>	<i>Gráfica de Tasa de Descuento TIR.</i>	97
<i>Figura 5.7</i>	<i>Gráfica de Inversión VPN.</i>	98
<i>Figura 5.8</i>	<i>Gráfica de Inversión TIR.</i>	98

**Lista de Tablas.**

		<i>Página</i>
Tabla 1.1	Gases que componen la atmósfera.	2
Tabla 1.2	Gases de Efecto Invernadero.	6
Tabla 2.1	Emisiones de dióxido de carbono de las Partes Anexo I y su parte del total en 1990.	8
Tabla 1.3	Efectos futuros en el clima.	15
Tabla 3.1	Clasificación de actividades de proyectos Tipo I: Energías renovables.	31
Tabla 3.2	Clasificación de actividades de proyectos Tipo II: Eficiencia energética.	32
Tabla 3.3	Clasificación de actividades de proyectos Tipo III: Reducción de emisiones.	32
Tabla 4.1	Rango de Valores de k Sugeridos según la Precipitación Anual.	43
Tabla 4.2	Valores de Lo Sugeridos según el Contenido Orgánico del Residuo.	48
Tabla 4.3	Tiempo de descomposición de los residuos por fase.	49
Tabla 4.4	Rangos Generales de Costos de Pozos Verticales.	60
Tabla 4.5	Problemas comunes en la recuperación del combustible y del sistema de recolección.	70
Tabla 4.6	Tecnologías de Utilización de GRS y Rangos Típicos de Flujo/Potencia.	71
Tabla 5.1	Características de motogeneradores instalados.	73
Tabla 5.2	Tipo de cambio entre el peso mexicano y el dólar americano de 1991 a 1999.	74
Tabla 5.3	Tipo de cambio entre el peso mexicano y el dólar americano de 2000 a 2002.	75
Tabla 5.4	Tasas de Inflación.	76
Tabla 5.5	Costos de Operación y Mantenimiento en el 2002.	76
Tabla 5.6	Costos de Operación y Mantenimiento en el 2005.	77
Tabla 5.7	Estimación de los Costos de Transacción por etapas del ciclo de aprobación.	78
Tabla 5.8	Costos de transacción iniciales.	81
Tabla 5.9	Gastos de Vigilancia, Verificación y de Certificación.	81
Tabla 5.10	Cargos de Adaptación.	82
Tabla 5.11	Gastos Totales de Transacción Operación y Mantenimiento.	82
Tabla 5.12	Energía eléctrica generada en el proyecto.	83
Tabla 5.13	Tarifas de alta tensión nivel transmisión (HT).	84
Tabla 5.14	Tarifas CFE del 1° de febrero al sábado anterior al primer domingo de abril.	84
Tabla 5.15	Tarifas CFE del primer domingo de abril al 31 de julio.	84
Tabla 5.16	Tarifas CFE del 1° de agosto al sábado anterior al último domingo de octubre.	84
Tabla 5.17	Tarifas CFE del último domingo de octubre al 31 de enero.	85
Tabla 5.18	Factor para cada tipo de demanda de la tarifa HT.	85
Tabla 5.19	Uso planeado de los motogeneradores.	85
Tabla 5.20	Ingresos estimados por venta de energía eléctrica.	86
Tabla 5.21	Emisiones anuales generadas sin la existencia de proyecto.	87
Tabla 5.22	Emisiones generadas con la existencia de proyecto.	88
Tabla 5.23	Reducciones de emisiones de CO <sub>2</sub> e.	89
Tabla 5.24	Utilidad de operación del proyecto.	90
Tabla 5.25	Apalancamiento financiero con tasa de interés del 10% anual.	91
Tabla 5.26	Flujo de caja del ejercicio del proyecto.	92
Tabla 5.27	Precio de RCE's para caso base y rangos adoptados.	99

**Lista de Unidades.**

CO <sub>2</sub>	<i>Dióxido de Carbono</i>
CH <sub>4</sub>	<i>Metano</i>
CO <sub>2</sub> e	<i>Dióxido de Carbono equivalente</i>
mi	<i>Miles de toneladas</i>
mtCO <sub>2</sub> e	<i>Miles de toneladas de Dióxido de Carbono equivalente</i>
tCO <sub>2</sub> e	<i>Tonelada de Dióxido de Carbono equivalente</i>
kWh	<i>Kilowatt hora</i>
GWh	<i>Gigawatts hora eléctricos</i>
tCO <sub>2</sub> e/MWh	<i>Toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes por Megawatt hora.</i>
MWt	<i>Megawatts térmicos.</i>
pcm	<i>Pies cúbicos por minuto.</i>
Btu/scfm <sup>1</sup>	<i>Btu<sup>2</sup> por cada pie cúbico estándar minuto</i>
\$	<i>Pesos Moneda Nacional</i>
M\$	<i>Millones de pesos Moneda Nacional</i>
US\$	<i>Dólares de americanos</i>

<sup>1</sup> Standard cubic feet per minute. SCFM o scfm. Flujo de aire medido en algún punto de referencia y convertido a un condiciones de referencia estándar, (por ejemplo 14.4 pounds por pulgadas cuadradas absolutas, 80° F y 60% de humedad relativa). Scfm significa cfm a condiciones estándar. Sin embargo estándares varían y requiere de cuidado ( en EUA un valor usual de estándar es 14.696 psia y 60° F).

<http://www.pneumatic-source.com/resources/glossary/s.shtml>

<sup>2</sup> 1 Btu (British thermal unit) = 252 calorías = 1054 J

## CONTENIDO

Contenido	Página
	i
Lista de acrónimos	iv
Lista de figuras	iv
Lista de tablas	v
Lista de unidades	vi
Introducción	vii

### CAPÍTULO 1: CAMBIO CLIMÁTICO

1.1 Atmósfera.	2
1.1.1 Composición de la atmósfera.	2
1.1.2 Funciones de la atmósfera.	2
1.1.3 Características físicas y químicas de la atmósfera.	3
1.2 Cambio climático.	3
1.3 Efecto invernadero y principales gases.	4
1.4 Cambios de clima observados.	7
1.4.1 Temperaturas registradas en superficie y en los océanos.	7
1.4.2 Temperaturas en las capas superiores de registros de satélite y globos meteorológicos.	7
1.4.3 Cambios observados en la cubierta de nieve y extensión de capas de hielo continentales y en el océano.	8
1.5 Efectos futuros.	8

### CAPÍTULO 2: POLÍTICAS INTERNACIONALES Y PROTOCOLO DE KYOTO.

2.1 Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (PICC).	11
2.1.1 Informes sobre aumento de temperatura.	11
2.2 Generalidades de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).	12
2.3 Protocolo de Kyoto.	14
➤ Mecanismos de Flexibilización.	16
➤ Implementación Conjunta (artículo 6).	16
➤ Comercio de Emisiones (artículo 17).	17



---

> Mecanismos de Desarrollo Limpio (artículo 12).	18
<b>CAPÍTULO 3: MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO.</b>	
3.1 Motivación del Mecanismo de Desarrollo Limpio.	21
3.2 Procedimiento que sigue un proyecto MDL.	21
3.3 Línea de Base.	23
3.4 Principio de Adicionalidad.	23
3.5 Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE's).	26
3.6 Fondo Prototipo Carbono.	26
> Oportunidades del mercado de carbono.	26
> Principales actores en el mercado del carbono.	27
3.7 Requisitos de elegibilidad.	29
3.8 Desarrollo sostenible.	30
3.9 Definición de los proyectos de pequeña escala.	31
3.10 Periodo de vida útil del proyecto.	33
3.11 Selección del período de acreditación.	33
<b>CAPÍTULO 4: PLANTAS DE ELECTRICIDAD CON BASE A BIOGÁS.</b>	
4.1 Relleno sanitario.	35
4.2 Caracterización de Gas de Relleno Sanitario y su dinámica de producción.	40
4.2.1 Clasificación de Gas de Relleno Sanitario.	50
4.3 Descripción de componentes de plantas de electricidad con base a biogás.	55
4.4 Desempeño de equipo de plantas con base a biogás.	69
<b>CAPÍTULO 5. ASPECTOS ECONÓMICOS DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD DE PLANTAS CON BASE A BIOGÁS.</b>	
5.1 Costos de Inversión, Operación y Mantenimiento.	73

---

5.2 Costos de transacción de proyectos MDL.	77
5.2.1 Costos de transacción por etapas del ciclo de aprobación.	77
5.3 Ingresos por venta de energía eléctrica.	82
5.3.1 Cálculo de tarifa eléctrica.	84
5.4 Ingresos adicionales atribuibles a las Reducciones Certificadas de Emisiones.	86
5.4.1 La utilidad de operación y la depreciación.	90
5.4.2 Apalancamiento.	90
5.5 Recapitulación de supuestos de análisis.	92
5.5.1 Tasa de Descuento.	92
5.5.2 Mercado Estimado de RCE's.	93
5.5.3 Tarifa de Energía Eléctrica.	93
5.5.4 Tasa de Interés.	93
5.5.5 Tipo de Cambio.	93
5.5.6 Impuesto Sobre la Renta (ISR).	94
5.5.7 Factor de Emisión.	94
5.6 Rango de Variables Clave.	94
5.7 Análisis de Sensibilidad.	94
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>101</b>
<b>7. ANEXOS</b>	
Anexo A: Países incluidos en el Anexo I y Anexo II	103
Anexo B: NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-083-ECOL-1996	106
Anexo C: Países considerados como menos desarrollados.	120
<b>8. REFERENCIAS</b>	<b>122</b>

## Introducción

En este trabajo de tesis, se estudia la viabilidad de desarrollar un proyecto para generar energía eléctrica empleando como combustible gas metano de rellenos sanitarios, con ayuda del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) del Protocolo de Kyoto, sin recurrir a las formalidades de una "metodología aprobada", sino que se desarrolla a partir de primeros principios.

En el primer capítulo, se plantea la problemática del Cambio Climático asociado con los Gases de Efecto Invernadero, que son generados principalmente por las actividades humanas como la quema de combustibles fósiles. Además se abordan los cambios en el clima observados y los efectos futuros que pueden repercutir en el planeta.

En el capítulo dos, se presentan las diversas medidas adoptadas por parte de las Naciones Unidas para enfrentar el calentamiento global, tales como la creación del Panel Intergubernamental Sobre el Cambio Climático (PICC) y la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (CMNUCC), dando pie al nacimiento del Protocolo de Kyoto que propone el MDL y el comercio de emisiones entre otros puntos.

En la tercera parte, se explica a fondo el MDL, la motivación que impulsa a desarrollar proyectos de este tipo, así como la definición de los conceptos Línea Base y Adicionalidad. Asimismo, se estudian los pasos que debe seguir un proyecto MDL para lograr obtener las Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE). Por otra parte, se hace una clasificación de los tipos de proyectos y la selección del período de acreditación que se puede elegir.

En el capítulo cuatro, se describen los principales aspectos alrededor de un relleno sanitario, como sus gases, su dinámica de producción, y se revisa un modelo matemático para estimar el potencial de generación de gases. También, se realiza la descripción de los componentes de plantas de electricidad con base a biogás y su desempeño.

En el último capítulo, se presenta un estudio acerca de los aspectos económicos más relevantes, donde se incluyen los costos de inversión, operación y mantenimiento. Igualmente, se analizan los costos de transacción de proyectos MDL, y los ingresos generados tanto por la venta de energía eléctrica como por las RCE's, para evaluar la rentabilidad de un proyecto de esta clase.

Finalmente se presentan las conclusiones sobre el análisis.



# CAPÍTULO 1

## CAMBIO CLIMÁTICO

## 1.1 Atmósfera.

La atmósfera es una delgada capa gaseosa que rodea a la tierra y que, por acción de la fuerza de gravedad, sirve de protección y permite el desarrollo de la vida en la tierra. De hecho, sin la atmósfera la vida en la Tierra no podría existir, ya que provee a los diversos organismos con gases indispensables para poder vivir, forma parte importante en el ciclo hidrológico, sirve de protección al filtrar y absorber ciertas radiaciones solares y cósmicas y distribuye el calor emitido por el sol en toda la Tierra.

La atmósfera tuvo su origen después de la formación del planeta, al escapar de su interior una gran cantidad de gases cuando comenzó a enfriarse y actualmente, su densidad presenta un máximo de densidad de acuerdo a su proximidad con la superficie de la Tierra y paulatinamente se vuelve menos densa conforme se asciende en altura.

### 1.1.1 Composición de la atmósfera.

Actualmente, los gases esenciales que forman la atmósfera y su proporción en la misma son los presentados en la tabla 1.1.

*Tabla 1.1 Gases que componen la atmósfera.*

Gas	% en volumen
Nitrógeno	78.000
Oxígeno	20.033
Vapor de agua	1.000
Argón	0.934
CO <sub>2</sub>	0.033

Además del nitrógeno, el oxígeno, el argón, el dióxido de carbono y el vapor de agua existen otros gases tales como ozono, metano, hidrógeno, monóxido de carbono, amoníaco, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y gases nobles no participantes en reacciones químicas (neón, helio, criptón, xenón).

### 1.1.2 Funciones de la atmósfera.

Las funciones de la atmósfera sobre el planeta son numerosas y muy variadas:

- Contener los gases esenciales para la vida, tales como el oxígeno necesario para los seres animales y el dióxido de carbono necesario para que las plantas puedan realizar la fotosíntesis.
- Completar el ciclo del agua, ya que gracias a las precipitaciones el agua que se evapora regresa a la superficie terrestre.
- Filtrar las radiaciones solares nocivas, debido a la existencia de la capa de ozono es capaz de obstaculizar cerca del 90 % de los rayos ultravioletas provenientes del sol.

- Impedir la caída constante de material proveniente del espacio, ya que la gran mayoría de meteoritos que son atraídos por el campo gravitatorio de la Tierra se volatilizan por el contacto con los gases atmosféricos durante su caída.
- Evitar grandes contrastes térmicos.

### 1.1.3 Características físicas y químicas de la atmósfera.

Las características físicas y químicas de la atmósfera y el balance calorífico de la Tierra están determinadas por los procesos de transferencia de energía que ocurren en la atmósfera. No toda la energía solar que llega a la atmósfera alcanza la superficie de la tierra. Existen tres fenómenos atmosféricos que modifican la radiación solar que la atraviesa:

**Dispersión:** ocurre cuando las partículas pequeñas y las moléculas de gases dispersan parte de la radiación solar en direcciones aleatorias, sin alterar la longitud de onda de las mismas. La cantidad de radiación dispersada depende de dos factores: la longitud de onda de la radiación y el tamaño de las partículas y moléculas de los gases.

**Absorción:** fenómeno que ocurre cuando algunos gases son capaces de absorber parte de la radiación solar y la convierten en calor. La absorción de energía calorífica por los gases hace que éstos emitan también su propia radiación, pero de longitudes de onda mayores (infrarrojo).

**Reflexión:** fenómeno que consiste en que parte de la radiación solar incidente es reflejada al espacio. Este fenómeno es atribuible en gran medida a las nubes y partículas presentes en la atmósfera. La luz solar que alcanza la superficie terrestre sin ser modificada se denomina radiación solar directa; mientras que la radiación solar que alcanza la superficie terrestre después de ser alterada por el proceso de difusión se denomina radiación solar difusa. Así, toda la radiación que alcanza la atmósfera terrestre, solamente el 51% alcanza la superficie terrestre y no toda la radiación solar que alcanza la superficie terrestre puede ser utilizada. Esto se debe a que, al igual que ocurre en la atmósfera, la superficie terrestre refleja parte de esa radiación y la reflexión depende de los materiales que la forman.

## 1.2 Cambio Climático.

La temperatura media de la superficie terrestre ha subido más de 0.6°C desde los últimos años del siglo XIX. Se prevé que aumente de nuevo entre 1.4°C y 5.8°C para el año 2100, lo que representa un cambio rápido y profundo. Aun cuando el aumento real sea el mínimo previsto, será mayor que en cualquier siglo de los últimos 10,000 años.

La razón principal del aumento de la temperatura es un proceso de industrialización iniciado hace siglo y medio y, en particular, la quema de combustibles fósiles, la tala de bosques y algunos métodos de explotación agrícola.

Estas actividades han aumentado el volumen de "Gases de Efecto Invernadero" (GEI) en la atmósfera, sobre todo de dióxido de carbono, metano y óxido nítrico. Estos

gases se producen naturalmente y son fundamentales para la vida en la Tierra; impiden que parte del calor solar regrese al espacio, y sin ellos el mundo sería un lugar frío y desierto. Pero cuando el contenido de estos gases es considerable y crece sin descanso, provocan temperaturas artificialmente elevadas y modifican el clima. El decenio de 1990 parece haber sido el más cálido del último milenio, y 1998 el año más caluroso.

Según las previsiones, la actual tendencia hacia el calentamiento provocará algunas extinciones. Numerosas especies vegetales y animales, debilitadas ya por la contaminación y la pérdida de hábitat, no sobrevivirán los próximos 100 años. El ser humano, aunque no se ve amenazado de esta manera, se encontrará probablemente con dificultades cada vez mayores.

Según las previsiones, los rendimientos agrícolas disminuirán en la mayor parte de las regiones tropicales y subtropicales, pero también en las zonas templadas si el aumento de la temperatura es de más de unos grados. Se prevé también un proceso de desertificación de zonas continentales interiores, por ejemplo el Asia central, el Sahel africano y las Grandes Llanuras de los Estados Unidos. Estos cambios podrían provocar, como mínimo, perturbaciones en el aprovechamiento de la tierra y el suministro de alimentos. La zona de distribución de enfermedades como el paludismo podría ampliarse.

El nivel del mar subió por término medio entre 10 y 20 centímetros durante el siglo XX, y para el año 2100 se prevé un aumento adicional de 9 a 88 cm (el aumento de las temperaturas hace que el volumen del océano se expanda, y la fusión de los glaciares y casquetes polares aumenta el volumen de agua). Si se llega al extremo superior de esa escala, el mar podría invadir los litorales fuertemente poblados de países como Bangladesh, provocar la desaparición total de algunas naciones (como el Estado insular de las Malvinas), contaminar las reservas de agua dulce de miles de millones de personas y provocar migraciones en masa.

El calentamiento atmosférico es un problema "moderno": es complicado, afecta a todo el mundo y se entremezcla con cuestiones difíciles como la pobreza, el desarrollo económico y el crecimiento demográfico. No será fácil resolverlo. Ignorarlo, sería todavía peor.

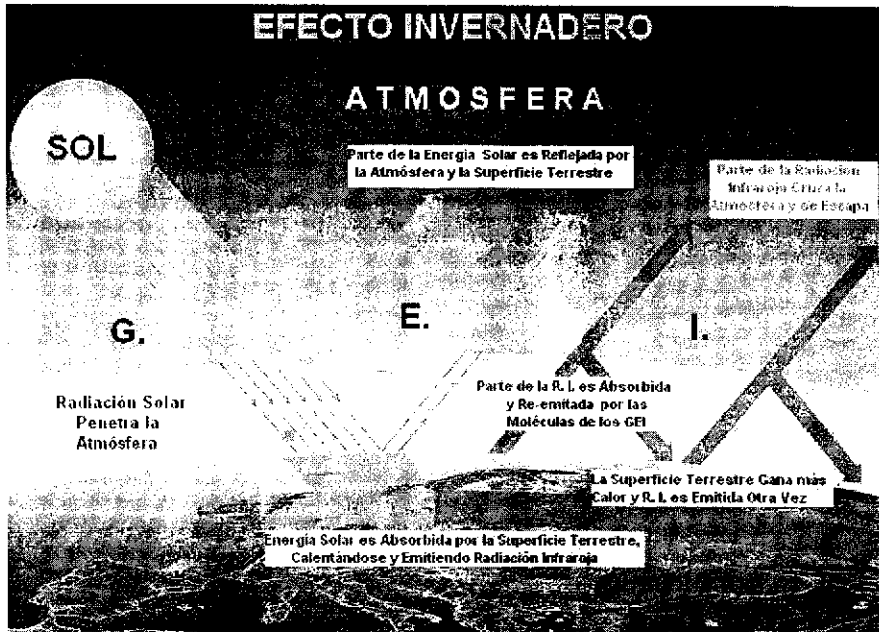
### 1.3 Efecto Invernadero y principales gases.

El efecto invernadero es un proceso natural mediante el cual las moléculas de oxígeno, nitrógeno, agua, anhídrido carbónico y del ozono son casi transparentes a la luz solar pero las moléculas de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$  y CFC's son parcialmente opacas a las radiaciones infrarrojas, es decir, que absorben a las radiaciones infrarrojas emitidas por el suelo que ha sido calentado por la luz solar. Cuando la radiación infrarroja<sup>1</sup> choca con las moléculas de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$  y CFC's es absorbida por ellas. Estas moléculas que vibran, se mueven y emiten energía en forma de rayos invisibles e infrarrojos en todas direcciones, provocan el fenómeno conocido como efecto invernadero, el cual se refiere al calentamiento global debido a la acumulación de los gases de efecto invernadero

<sup>1</sup> Los rayos infrarrojos o radiación térmica son un tipo de radiación electromagnética de una longitud de onda superior a la de la luz visible pero más corta que la de las microondas. El nombre de infrarrojo significa por debajo del rojo. El rojo es el color de longitud de onda más larga de la luz visible, comprendida entre 700 nanómetros y un milímetro.

provocada por la actividad humana, principalmente desde la revolución industrial por la quema de combustibles fósiles y la producción de nuevos productos químicos que mantiene caliente la atmósfera terrestre. Las radiaciones rebotan entre la mezcla de moléculas que componen a la atmósfera hasta que finalmente escapan al espacio sideral. Una delgada capa de gases de efecto invernadero atrapa radiación y aumenta la temperatura. Lo anterior se ilustra en la figura 1.1.

Figura 1.1 Efecto Invernadero.



Fuente: Okanagan University College de Canadá, Departamento de Geografía; Organismo de protección de medio ambiente (EPA) de los Estados Unidos, Washington, Climate change 1995, The science of climate change, contribución del grupo de trabajo 1 al segundo informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, PNUMA y Organización Meteorológica Mundial (OMM), Cambridge University Press, 1996. GRID Arendal.

### Principales gases de efecto de invernadero.

Los gases de invernadero son principalmente el vapor de agua, el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y los considerados indirectos por contribuir a la formación atmosférica del ozono: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y compuestos orgánicos volátiles (COV). En las últimas décadas a éstos se les han sumado otros manufacturados por el hombre, como los clorofluorocarbonos (CFCs), perfluorocarbonos (PFCs), hidrofluorocarbonos (HFCs) y hexafluoruro de azufre.

El potencial de calentamiento global (PCG) se define como la relación entre la capacidad de un gas de efecto invernadero de almacenar calor en la atmósfera con la capacidad de dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ). En la tabla 1.2 se pueden observar las principales fuentes y características de los gases de invernadero más importantes.



Tabla 1.2 Gases de Efecto Invernadero.

Gas	Fuentes	Símbolo Químico	Vida atmosférica (años)	PCG a 100 años
Dióxido de Carbono	Quema de combustibles fósiles (carbón, derivados de petróleo y gas), producción de cemento, cambio de uso de suelo.	CO <sub>2</sub>	50-200 <sup>2</sup>	1
Metano	Descomposición anaerobia (Cultivo de arroz, rellenos sanitarios, estiércol), minas y pozos petroleros.	CH <sub>4</sub>	12	21
Oxido Nitroso	Producción de fertilizantes, quema de combustibles fósiles.	N <sub>2</sub> O	120	310
Hidrofluorocarbonos (HFC)	Emitidos en procesos de manufactura y usados como refrigerantes.	HFC23 (CHF <sub>3</sub> ) HFC125 (CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub> ) HFC 134a (CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub> ) HFC 152a (CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub> )	1.5 - 264	140 -11,700
Perfluorocarbonos (PFC)	Emitidos en procesos de manufactura y usados como refrigerantes.	CF <sub>4</sub> C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	100-2000	6,500 - 9,200
Hexafluoruro de Azufre	Emitido en procesos de manufactura donde se usa como fluido dieléctrico	SF <sub>6</sub>	3,200	23,900

Fuente: Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. WMO/UNEP. 1995.

<sup>2</sup> En el caso del CO<sub>2</sub> no es posible definir una vida atmosférica específica debido a las diferentes tasas de absorción de los diferentes procesos de secuestro.

Como se puede ver, algunos de ellos tienen mayor capacidad para retener radiación térmica que otros lo que se conoce como PCG. El metano, por ejemplo, es 21 veces más potente como gas de invernadero que el dióxido de carbono.

Si se observa el PCG, numéricamente se podría decir que el valor menos relevante es el de  $\text{CO}_2$ , pero se debe señalar que es el gas que más se emite a la atmósfera debido a las actividades humanas. Asimismo, los otros gases son importantes en los mecanismos de reacción ya que pueden presentar efectos secundarios como es la formación de ozono antropogénico. Además, por pequeñas que sean las variaciones, inciden considerablemente en los resultados, pues sólo hay 0.002 de  $\text{N}_2\text{O}$  y aplicando el potencial de calentamiento aumenta su magnitud.

#### **1.4 Cambios de clima observados.**

##### **1.4.1 Temperaturas registradas en superficie y en los océanos.**

La temperatura promedio global de la superficie se ha incrementado en  $0.6 \pm 0.2^\circ\text{C}$  desde la segunda mitad del siglo XIX. La década de los 90's fue muy probablemente la década más caliente, y 1998 (año de Niño) fue el año más caliente de los registrados desde 1861. Los calentamientos más recientes han sido mayores en tierra que en los océanos.

Los patrones regionales de calentamiento que sucedieron a principios del siglo XX, fueron distintos a los que ocurrieron en la segunda mitad. El periodo de calentamiento más reciente (1976 a 1999) ha sido casi global, pero los mayores cambios de temperatura han ocurrido sobre latitudes medias y grandes de los continentes del hemisferio norte.

Nuevos análisis indican que el contenido global de calor del océano se ha incrementado significativamente desde finales de los 50's. Más de la mitad del incremento de contenido de calor ha ocurrido en la parte superior de 300m del océano, el cual es equivalente a una tasa de incremento de temperatura en esa capa de  $0.04^\circ\text{C}/\text{década}$ .

Nuevos análisis de las temperaturas de superficie máximas y mínimas de 1950 a 1993, muestran que el rango de la temperatura diurna está disminuyendo ampliamente, pero no es generalizado. En promedio, las temperaturas mínimas están incrementando  $0.2^\circ\text{C}/\text{década}$  mientras que las temperaturas máximas a razón de  $0.1^\circ\text{C}/\text{década}$ .

##### **1.4.2 Temperaturas en las capas superiores de registros de satélite y globos meteorológicos.**

Mediciones de temperatura de superficie, globos y satélite muestran que la troposfera y la superficie de la Tierra se ha calentado y la estratosfera se ha enfriado. En el periodo corto de tiempo en que ha habido datos de mediciones de satélites y globos meteorológicos (desde 1979), los datos de estos últimos muestran un calentamiento significativamente menor en la troposfera baja que el observado en la superficie. Los análisis de las tendencias desde 1958 de los 8km más bajos de la atmósfera y superficie muestran un calentamiento de  $0.1^\circ/\text{década}$ . Sin embargo, desde el inicio de los registros

de datos de satélites en 1979, los datos de temperatura de ambos satélites y globos meteorológicos muestran un calentamiento, en la troposfera media a baja, de aproximadamente  $0.05 \pm 0.10^\circ\text{C}$  por década. La temperatura promedio de superficie se ha incrementado significativamente en  $0.15 \pm 0.05^\circ\text{C}/\text{década}$ .

### 1.4.3 Cambios observados en la cubierta de nieve y extensión de capas de hielo continentales y en el océano.

La disminución de la cubierta de nieve y la extensión continental de capa de hielo siguen estando correlacionados con el aumento de temperatura en la superficie terrestre. Los datos de satélites muestran que desde 1960, ha habido una disminución del orden del 10% en la extensión de la cubierta de nieve.

Las cantidades de hielo en el océano del Hemisferio Norte ha disminuido, pero no hay tendencias marcadas en la extensión de las capas de hielo en los océanos del Antártica. Desde los 50's, ha habido un retroceso en la primavera y verano de un 10 a 15% de la extensión de hielo del Océano Ártico, que son consistentes con el incremento de temperatura de primavera y de menor grado con las temperaturas de verano en latitudes altas. El Hemisferio Sur la extensión de la capa de hielo ha permanecido estable, o más aún ha incrementado ligeramente.

Existen datos nuevos que indican que ha habido una disminución del orden de 40% del grosor de la capa de hielo en el Océano Ártico a fines del verano y principios del otoño en el periodo de 1958 a 1976 y a mediados de los 1990s, y una disminución menor en invierno.

### 1.5 Efectos futuros.

En la tabla 1.3 se muestran algunos ejemplos de variabilidad climática, sus episodios climáticos extremos y repercusiones.

Tabla 1.3 Efectos futuros en el clima.

Cambios proyectados	Efectos proyectados
Temperaturas máximas más elevadas, más días calurosos y oleadas de calor en casi todas las zonas terrestres. <b>Prognosis: muy probable</b>	▲ Incidencia de defunciones y graves enfermedades en personas de edad y en la población rural pobre. ▲ Estrés térmico en el ganado y en la flora y fauna silvestres. ▲ Riesgo de daños a varios cultivos. ▲ Demanda de refrigeración eléctrica. ▼ Fiabilidad del suministro de energía.
Temperaturas mínimas más elevadas, y menos días fríos, días de heladas y oleadas de frío en casi todas las zonas terrestres. <b>Prognosis: muy probable</b>	▼ Morbilidad y mortalidad humana relacionada con el frío. ▼ Riesgo de daños para varios cultivos. ■ Distribución y actividad de algunas plagas y vectores de enfermedades. ▼ Demanda de energía calorífica.
Episodios de precipitaciones más intensas. <b>Prognosis: muy probable, en muchas zonas</b>	▲ Daños provocados por inundaciones, desprendimientos de tierras y avalanchas. ▲ Erosión del suelo. ▲ La escorrentía de las inundaciones podría aumentar la recarga de los acuíferos de algunas llanuras de inundación. ▲ Presión sobre los sistemas públicos y privados de socorro en caso de desastre y de seguro frente a inundaciones.

Fuente: (Basado en) IPCC 2001. Tercer informe de evaluación

Continuación Tabla 1.3 Efectos futuros en el clima.

Cambios proyectados	Efectos proyectados
Mayor deshidratación veraniega en la mayor parte de las zonas continentales interiores de latitud media y riesgo asociado de sequía. <b>Prognosis: probable</b>	▼ Rendimientos de los cultivos. ▲ Daños en los cimientos de los edificios provocados por la contracción del suelo. ▲ Riesgo de incendios forestales. ▼ Cantidad y calidad de los recursos hídricos interiores de latitud media y riesgo asociado de sequía.
Aumento de las intensidades eólicas máximas de los ciclones tropicales, y de la intensidad de las precipitaciones medias y máximas. <b>Prognosis: probable, en algunas zonas</b>	▲ Riesgos para la vida humana, riesgo de epidemias de enfermedades infecciosas. ▲ Erosión costera y daños en los edificios de infraestructura de la costa ▲ Daños en los ecosistemas costeros, como los arrecifes de coral y los manglares.
Intensificación de las sequías e inundaciones asociadas con El Niño en muchas regiones. <b>Prognosis: probable</b>	▼ Productividad agrícola y de los pastizales en las regiones expuestas a la sequía y las inundaciones. ▼ Potencial de generación de electricidad en las regiones expuestas a la sequía.
Mayor variabilidad de las precipitaciones del monzón de verano en Asia. <b>Prognosis: probable</b>	▲ Magnitud de las inundaciones y de la sequía y daños en las tierras templadas y tropicales de Asia.
Mayor intensidad de las tormentas de latitud media. <b>Prognosis: poco acuerdo entre los modelos actuales</b>	▲ Riesgos para la vida y la salud humana. ▲ Pérdidas de bienes materiales e infraestructura. ▲ Daños en los ecosistemas costeros. <b>Claves:</b> ▲ Aumento ■ Ampliación ▼ Disminución

Fuente: (Basado en) IPCC 2001. Tercer informe de evaluación

Debido a los problemas mencionados en este capítulo, la Organización de las Naciones Unidas, tomó algunas medidas para controlar los efectos causados por las actividades antropogénicas, como por ejemplo el Protocolo de Kyoto entre otras, mismas que se explican en el siguiente capítulo.



CAPÍTULO 2

POLÍTICAS INTERNACIONALES Y  
PROTOCOLO DE KYOTO

## 2.1 Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (PICC).

En el año de 1988 las Naciones Unidas a Través de su programa de Medio Ambiente y la Organización Meteorológica Mundial establecieron un grupo llamado Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (PICC), con el objetivo de estudiar científicamente el problema del Cambio Climático.

El PICC trata de evaluar las emisiones bajo políticas internacionales pactadas con el fin de obtener una reducción drástica de las mismas. Su éxito no ha sido el esperado debido a la incertidumbre mundial sobre la tendencia de que el hombre y sus actividades son culpables, o si sólo se trata de un proceso natural. Los temas que este organismo estudia para profundizar y así reducir los niveles de incertidumbre son:

- En qué forma y grado la Tierra puede regular los gases de efecto invernadero.
- Cómo cuantificar mejor los efectos de la nubosidad sobre la radiación solar y terrestre.
- Cómo evaluar con más exactitud las consecuencias termodinámicas de la precipitación y evaporación.
- Cómo ajustar los valores reales de la energía almacenada y transportada por los océanos.
- Ajustar los valores de intercambio de masa y energía entre los ecosistemas dinámicos y su ambiente exterior.

### 2.1.1 Informes sobre aumento de temperatura.

Según el informe del 22 de enero del 2001 en Shanghai, la nueva evaluación del PICC, pronostica un aumento de hasta 5.8 grados centígrados de la temperatura global dentro de los próximos 100 años, y de que gran parte del problema ha sido de origen humano en los últimos 50 años. Gracias al análisis en los glaciares, anillos de árboles y corales, se ha encontrado que el aumento de temperatura en los últimos 100 años no es usual ni natural. En la década de los noventa se han registrado los años más calurosos desde hace 1,000 años.

El estimado en el aumento de la temperatura global crece con cada informe que aparece, esto debido a que informes más recientes registran aumentos en las emisiones de gases que provocan un cambio climático y por lo tanto los efectos se hacen más bruscos.

El informe de Shanghai se da a conocer el registro de que en el hemisferio norte la cubierta de nieve se pudo haber reducido un 10% desde hace unos 40 años, y que la duración de los hielos en lagos y ríos se ha acortado dos semanas. Este informe del PICC muestra que la concentración de dióxido de carbono ha crecido un 31% desde 1750 a 367 partículas por millón.

Los modelos con respecto a la subida del nivel del mar se mantienen más o menos constantes, prediciendo un aumento de cuando menos medio metro para el 2100, así como un aumento de lluvia en zonas del hemisferio norte pero con rápida evaporación.

## **2.2 Generalidades de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC).**

El 11 de Diciembre de 1990, las Naciones Unidas crearon un Comité Intergubernamental de Negociación con la tarea de elaborar una Convención Marco sobre el Cambio Climático. Este Comité, tras cinco sesiones de negociación, preparó la Convención Marco sobre el Cambio Climático, que fue aceptada en Nueva York en Mayo de 1992.

El objetivo principal de la convención (Artículo 2) es lograr la estabilización de las concentraciones de los gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida riesgos peligrosos en el sistema climático. Este nivel debería alcanzarse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible.

Una particularidad de la CMNUCC es que alude, en su artículo número 4, a las responsabilidades comunes pero diferenciadas, y a las capacidades relativas a la cooperación científica, técnica y tecnológica, información pública y transferencia de recursos. Para tal efecto, la convención establece una clara distinción entre los países desarrollados (listados en el Anexo I) y aquellos con economías en transición (ver anexo C de esta tesis), que constituyen históricamente la fuente del 75% de las emisiones antropogénicas de GEI, y los países en desarrollo a los que sólo se les podría exigir la adopción de políticas y medidas de mitigación cuando estuvieran disponibles los recursos financieros y las tecnologías que para ese propósito deben facilitar los países industrializados.

Por otro lado, existen obligaciones para todos los Estados parte, a saber: elaboración de inventarios de emisiones antropogénicas y de eliminación de sumideros y medidas de mitigación; promoción y cooperación en el desarrollo, aplicación y difusión (transferencia de tecnología, prácticas y procesos que controlan, reducen o previenen las emisiones en todos los sectores), y realización de métodos como las evaluaciones de impacto ambiental, con el fin de minimizar los efectos adversos en la economía, salud pública y calidad del ambiente de los proyectos o medidas llevadas a cabo para mitigar o adaptarse al cambio climático (artículos 4 y 12).

Para la ejecución de sus disposiciones, la convención cuenta con cinco órganos: la Conferencia de las Partes (COP), que es el máximo órgano que se reúne todos los años, el cual tiene a su cargo la promoción y supervisión de la aplicación de la CMNUCC y de sus instrumentos conexos (artículo 7); la Secretaría, cuyas funciones son, entre otras, organizar los periodos de sesiones de la Conferencia de las Partes y de los órganos subsidiarios, preparar informes, asistir a las partes y asegurar la coordinación con las secretarías de los demás órganos internacionales pertinentes (artículo 8); el Órgano Subsidiario de Asesoramiento Científico y Tecnológico (OSACT), para asesorar científica y tecnológicamente a la Conferencia de las Partes y otros órganos (artículo 9); el Órgano Subsidiario de Ejecución (OSE), que colabora en la supervisión del cumplimiento de la convención (artículo 10), y el Mecanismo de Financiación, encargado de suministrar los recursos financieros (artículo 11).

Cabe mencionar que la transmisión de comunicaciones nacionales y su revisión por los órganos de la convención (artículos 7 y 12); el Mecanismo Consultivo Multilateral

(artículo 13), y el arreglo pacífico de controversias (artículo 14), constituyen los mecanismos de control para garantizar la aplicación de la CMNUCC. Finalmente, la Convención aborda los aspectos relativos a la elaboración de Anexos y Protocolos, el procedimiento de enmienda, ratificación y entrada en vigor (artículos 15-25).

La convención es un instrumento marco sin efectos vinculantes que establece obligaciones de carácter general para las partes y cuenta con el aparato jurídico e institucional necesario para desarrollar acciones posteriores que permitan su consolidación.

Como parte de los avances tendentes a subsanar las inconsistencias de la CMNUCC, se han desarrollado, hasta la fecha, diez conferencias de las partes:

Segunda Conferencia de las Partes (COP 2), reunida en Ginebra del 9 al 18 de diciembre de 1996. Se reafirmó el "Mandato de Berlín" para reconocer que los compromisos de los países desarrollados en cuanto a reducir sus emisiones de GEI a los niveles de 1990 antes del año 2000 no eran adecuados para alcanzar los objetivos de la convención; por tanto, se estableció un proceso que, a través de la adopción de un protocolo u otro instrumento jurídico, permitiría a las partes tomar las medidas apropiadas para el periodo posterior al año 2000, incluido el reforzamiento de las obligaciones de los países desarrollados.

Tercera Conferencia de las Partes (COP3), se desarrolló en Kyoto, del 10. al 11 de diciembre de 1997, donde se estableció, por primera vez, un compromiso vinculante y específico de limitación de las emisiones netas de GEI para los países desarrollados, incluyendo en ellos a los países en tránsito a economías de mercado.

Cuarta Conferencia de las Partes (COP4), se llevó a cabo del 2 al 13 de noviembre de 1998 en Buenos Aires. Se adoptó un "Plan de Acción" que establece plazos para afinar los detalles sobresalientes del Protocolo de Kyoto y permitir su funcionalidad al entrar en vigor después del año 2000.

Quinta Conferencia de las Partes (COP5), realizada del 25 de octubre al 5 de noviembre de 1999 en Bonn, Alemania. Fueron emitidas 32 decisiones de importancia para las partes de la CMNUCC relativas a la aplicación del "Plan de Acción", investigación y observación sistemática, recopilación y síntesis de las comunicaciones nacionales para las partes no incluidas en el Anexo I de la convención, desarrollo y transferencia de tecnologías, capacidad institucional en países en vías de desarrollo, aplicación conjunta, uso del suelo y, entre otras, el programa presupuestal para el bienio 2000-2001 por un monto de \$25,286,000 dólares, en cuya escala de contribuciones correspondió a México un 0.995%.

Sexta Conferencia de las Partes (COP 6), inició el 25 de noviembre de 2000 en La Haya y después de dos semanas de intensas negociaciones, las pláticas sobre la puesta en marcha del Protocolo de Kyoto y el fortalecimiento financiero y de cooperación técnica entre los países desarrollados y en vías de desarrollo en políticas sobre el clima y tecnología, fueron suspendidas. Así, temas fundamentales se dejaron pendientes para retomarlos en las negociaciones celebradas en el 2001.

Séptima Conferencia de las Partes (COP 7), 2001 en Marrakech, se traslada el Acuerdo Político adoptado en Bonn a decisiones legales jurídicamente vinculantes. Son



conocidas como los Acuerdos de Marrakech, se hicieron posible en que los países Partes de la Convención pudieran iniciar sus respectivos procesos de ratificación.

Asimismo, se desarrolla una parte referida a los mecanismos de flexibilidad formada por cuatro decisiones: una común, sobre el ámbito y los principios generales de estos mecanismos; y otras tres, relativas a las reglas de funcionamiento de los mecanismos de Implementación Conjunta, Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y Comercio de Emisiones.

Octava Conferencia de las Partes (COP8), 2002 en Nueva Delhi, se producen avances significativos en aspectos técnicos sobre el Mecanismo de Desarrollo Limpio y su Junta Ejecutiva, como son algunas características de los sumideros de GEI o el tipo de metodologías que pueden ser utilizadas. Otro resultado de esta COP fue la aprobación de la Declaración de Delhi sobre Cambio Climático y Desarrollo Sostenible, donde se reafirman que el desarrollo y la erradicación de la pobreza son temas prioritarios para los países menos desarrollados, que deben compatibilizarse con la aplicación de los compromisos recogidos en la Convención.

Novena Conferencia de las partes (COP 9), 2003 en Milán, se desarrollan modalidades y procedimientos para la inclusión de forestación y reforestación en el MDL, que son proyectos que tienen características muy específicas.

Décima Conferencia de las Partes (COP 10), Diciembre de 2004 en Buenos Aires. Además de adoptarse varios acuerdos sobre futuros compromisos a adquirir después del año 2012, se establecieron tres decisiones importantes en el ámbito del MDL: nuevas directrices relativas a procedimientos de este tipo de proyectos, diseño de la información precisa en proyectos de forestación y reforestación, y procedimientos para los proyectos de sumideros de carbono de pequeña escala. Se dio, además, un fuerte apoyo al fortalecimiento de la Junta Ejecutiva (JE) y el MDL.

### **2.3 Protocolo de Kyoto.**

El 11 de diciembre de 1997, 169 países firmaron el Protocolo de Kyoto el cual quedó abierto para la firma en marzo de 1998 y para entrar en vigor requería la ratificación de por lo menos 55 países que sean responsables del 55% del total de las emisiones de CO<sub>2</sub> de los países desarrollados en 1990. Después de que Rusia Ratificó el Protocolo de Kyoto (18 de Noviembre de 2004), el pasado 16 de Febrero de 2005 ha entrado en vigor este protocolo, al haberse cumplido todas las condiciones necesarias para su vigencia.

El Protocolo de Kyoto se considera el acuerdo de más largo alcance jamás adoptado sobre el medio ambiente y desarrollo sostenible, debido al gran número de factores socioeconómicos que involucran para evitar un cambio climático. Los científicos se dieron cuenta de que el clima ya había empezado a cambiar tres años después de la Convención sobre Cambio Climático, cuando el PICC publicó su segunda importante evaluación de investigaciones. En dicho informe se confirmó la existencia de muchas estrategias económicas eficaces para reducir las emisiones de GEI. Aunque algunos países estabilizaron los niveles de emisiones, globalmente siguen aumentando.

El acuerdo estableció que los compromisos de limitación y reducción de GEI son jurídicamente vinculantes y deberán alcanzarse en un periodo de cinco años.

Fundamentalmente, se pretende que los países desarrollados, incluidos en el Anexo I del Protocolo, reduzcan las emisiones de seis GEI, el **dióxido de carbono**, **metano**, **óxido nítrico**, **hidrofluorocarbonos (HFC)**, **perfluorocarbonos (PFC)** y **hexafluoruro de azufre (SF6)**, en un 5.2% con respecto a los niveles de emisión de 1990, es decir, que las emisiones tienen que ser menores a las de ese año, en el periodo 2008-2012. Dichas emisiones y compromisos por parte de los países se muestran en la tabla 2.1

Además de tratar de consumir menos combustibles fósiles para evitar la generación de dióxido de carbono, el protocolo sugiere la ampliación de bosques y sumideros naturales para absorber dióxido de carbono.

Tabla 2.1 Emisiones de dióxido de carbono de las Partes Anexo I y su parte del total en 1990.

Parte	Emisiones de CO2 en 1990 (Mt)	%
Alemania*	1,012,443	7,4
Australia	288,965	2,1
Austria*	59,200	0,4
Bélgica*	113,405	0,8
Bulgaria	82,990	0,6
Canadá	457,441	3,3
Dinamarca*	62,100	0,4
EEUU.	4,957,022	36,1
Eslovaquia	58,278	0,4
España*	260,654	1,9
Estonia	37,797	0,3
Federación de Rusia	2,388,720	17,4
Finlandia*	53,900	0,4
Francia*	366,536	2,7
Grecia*	82,100	0,6
Hungría	71,673	0,5
Irlanda*	30,719	0,2
Islandia	2,172	0,0
Italia*	428,941	3,1
Japón	1,173,360	8,5
Letonia	22,976	0,2
Liechtenstein	208	0,0
Luxemburgo*	11,343	0,1
Mónaco	71	0,0
Noruega	35,533	0,3
Nueva Zelanda	25,530	0,2
Países Bajos*	167,600	1,2
Polonia	414,930	3,0
Portugal*	42,148	0,3
Reino Unido*	584,078	4,3
República Checa	169,514	1,2
Rumania	171,103	1,2
Suecia*	61,256	0,4
Suiza	43,800	0,3
* Total de los 15 Estados miembros de la Comunidad Europea 24,2		

Fuente: Revista Energía en Debate. Año No. 2/Volumen II/abril-mayo 05

En el Protocolo de Kyoto también se discutió mucho sobre el segundo gas más importante, el metano el cual contribuye también en el cambio climático y es liberado por los cultivos de arroz, los animales domesticados como el ganado, y el tratamiento de

basura y desechos humanos. Por suerte las emisiones de dicho gas están en descenso en los países desarrollados, pero aun plantea una amenaza. En los países desarrollados también están en descenso las emisiones de oxido nitroso que son liberadas con los abonos.

También son responsables de un brusco cambio climático los clorofluorocarbonos, ya que ellos reducen la capa de ozono haciendo inhabitable la superficie terrestre. Estos gases no los contempla el Protocolo de Kyoto debido a su aparición en el Protocolo de Montreal de 1987 y a que su concentración se está estabilizando y se espera que disminuya con el tiempo. La repercusión de que los clorofluorocarbonos es el aumento de los gases HFC y de los PFC que son los sucedáneos de los clorofluorocarbonos creados también por la industria, no afecta al ozono, pero sí son potentes gases que contribuyen al efecto invernadero.

### **Mecanismos de Flexibilización.**

El Protocolo de Kyoto reconoce los altos costos económicos y sociales que implica el cumplimiento de las metas de reducción aceptadas por las Partes Anexo I. Como respuesta, el Protocolo establece tres mecanismos de flexibilidad: Implementación Conjunta, Comercio de Emisiones y Mecanismos de Desarrollo Limpio, que son complementarios a las reducciones que los países hagan en su territorio, que permitirán a éstos alcanzar sus objetivos de una manera más eficiente.

#### ➤ Implementación Conjunta entre partes Anexo I (Art. 6).

1. A los efectos de cumplir los compromisos contraídos en virtud del artículo 3, toda Parte incluida en el Anexo I podrá transferir a cualquiera otra de esas Partes, o adquirir de ella, las unidades de reducción de emisiones resultantes de proyectos encaminados a reducir las emisiones antropógenas por las fuentes o incrementar la absorción antropógena por los sumideros de los gases de efecto invernadero en cualquier sector de la economía, con sujeción a lo siguiente:

a) Todo proyecto de ese tipo deberá ser aprobado por las Partes participantes;

b) Todo proyecto de ese tipo permitirá una reducción de las emisiones por las fuentes, o un incremento de la absorción por los sumideros, que sea adicional a cualquier otra reducción u otro incremento que se produciría de no realizarse el proyecto;

c) La Parte interesada no podrá adquirir ninguna unidad de reducción de emisiones si no ha dado cumplimiento a sus obligaciones derivadas de los artículos 5 y 7; y

d) La adquisición de unidades de reducción de emisiones será suplementaria a las medidas nacionales adoptadas a los efectos de cumplir los compromisos contraídos en virtud del artículo 3.

2. La Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo podrá, en su primer período de sesiones o tan pronto como sea posible después de éste, establecer otras directrices para la aplicación del presente artículo, en particular a los efectos de la verificación y presentación de informes.

3. Una Parte incluida en el Anexo I podrá autorizar a personas jurídicas a que participen, bajo la responsabilidad de esa Parte, en acciones conducentes a la generación, transferencia o adquisición en virtud de este artículo de unidades de reducción de emisiones.

4. Si, de conformidad con las disposiciones pertinentes del artículo 8, se plantea alguna cuestión sobre el cumplimiento por una Parte incluida en el Anexo I de las exigencias a que se refiere el presente artículo, la transferencia y adquisición de unidades de reducción de emisiones podrán continuar después de planteada esa cuestión, pero ninguna Parte podrá utilizar esas unidades a los efectos de cumplir sus compromisos contraídos en virtud del artículo 3 mientras no se resuelva la cuestión del cumplimiento.

➤ Mecanismo de Desarrollo Limpio (Art. 12).

1. Por el presente se define un mecanismo para un desarrollo limpio.

2. El propósito del mecanismo para un desarrollo limpio es ayudar a las Partes no incluidas en el Anexo I a lograr un desarrollo sostenible y contribuir al objetivo último de la Convención, así como ayudar a las Partes incluidas en el Anexo I a dar cumplimiento a sus compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones contraídos en virtud del artículo.

3. En el marco del mecanismo para un desarrollo limpio:

a) Las Partes no incluidas en el Anexo I se beneficiarán de las actividades de proyectos que tengan por resultado reducciones certificadas de las emisiones; y

b) Las Partes incluidas en el Anexo I podrán utilizar las reducciones certificadas de emisiones resultantes de esas actividades de proyectos para contribuir al cumplimiento de una parte de sus compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones contraídos en virtud del artículo 3, conforme lo determine la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo.

4. El mecanismo para un desarrollo limpio estará sujeto a la autoridad y la dirección de la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo y a la supervisión de una junta ejecutiva del mecanismo para un desarrollo limpio.

5. La reducción de emisiones resultante de cada actividad de proyecto deberá ser certificada por las entidades operacionales que designe la Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo sobre la base de:

a) La participación voluntaria acordada por cada Parte participante;

b) Unos beneficios reales, mensurables y a largo plazo en relación con la mitigación del cambio climático; y

c) Reducciones de las emisiones que sean adicionales a las que se producirían en ausencia de la actividad de proyecto certificada.

6. El mecanismo para un desarrollo limpio ayudará según sea necesario a organizar la financiación de actividades de proyectos certificados.

7. La Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo en su primer período de sesiones deberá establecer las modalidades y procedimientos que permitan asegurar la transparencia, la eficiencia y la rendición de cuentas por medio de una auditoría y la verificación independiente de las actividades de proyectos.

8. La Conferencia de las Partes en calidad de reunión de las Partes en el presente Protocolo se asegurará de que una parte de los fondos procedentes de las actividades de proyectos certificadas se utilice para cubrir los gastos administrativos y ayudar a las Partes que son países en desarrollo particularmente vulnerables a los efectos adversos del cambio climático a hacer frente a los costos de la adaptación.

9. Podrán participar en el mecanismo para un desarrollo limpio, en particular en las actividades mencionadas en el inciso a) del párrafo 3 supra y en la adquisición de unidades certificadas de reducción de emisiones, entidades privadas o públicas, y esa participación quedará sujeta a las directrices que imparta la junta ejecutiva del mecanismo para un desarrollo limpio.

10. Las reducciones certificadas de emisiones que se obtengan en el período comprendido entre el año 2000 y el comienzo del primer período de compromiso podrán utilizarse para contribuir al cumplimiento en el primer período de compromiso.

➤ Comercio de los Derechos de Emisión (Art. 17).

La Conferencia de las Partes determinará los principios, modalidades, normas y directrices pertinentes, en particular para la verificación, la presentación de informes y la rendición de cuentas en relación con el comercio de los derechos de emisión. Las Partes incluidas en el Anexo II podrán participar en operaciones de comercio de los derechos de emisión a los efectos de cumplir sus compromisos dimanantes del artículo 3. Toda operación de este tipo será suplementaria a las medidas nacionales que se adopten para cumplir los compromisos cuantificados de limitación y reducción de las emisiones dimanantes de ese artículo.

Como se señaló en este capítulo, el Protocolo de Kyoto incluye dentro de sus Mecanismos de Flexibilización al Mecanismo de Desarrollo Limpio, mismo que motiva tanto a países del primer mundo como a países en vías de desarrollo, como se verá con mayor detalle en el capítulo siguiente.



**CAPÍTULO 3**

**MECANISMO DE DESARROLLO  
LIMPIO**

En el artículo 12 del Protocolo de Kyoto se establece este mecanismo con la finalidad de ayudar a las partes no incluidas en el Anexo I de la CMNUCC a lograr el desarrollo sostenible; así como ayudar a las partes del Anexo I a cumplir con sus compromisos de reducción de emisiones estipulados en el artículo 3º del mismo.

El Protocolo de Kyoto también permite la participación de las empresas públicas o privadas en el mecanismo de desarrollo limpio, bajo la dirección de una junta ejecutiva, sujeta a la autoridad y dirección de la Reunión de las Partes, que a su vez es la responsable de canalizar los fondos para el financiamiento de proyectos en los países en vías de desarrollo.

El MDL a través de proyectos específicos certifica reducciones de emisiones y, eventualmente, unidades de secuestro de carbono para el cumplimiento de los compromisos cuantificados de los países del Anexo I.

La reducción de emisiones resultante de cada proyecto es validada y/o certificada por las entidades operacionales designadas por la COP, sobre la base de:

- a) La participación voluntaria de cada Parte involucrada.
- b) Los beneficios en la mitigación del cambio climático que sean reales, medibles y de largo plazo.
- c) Cumplir con el Principio de Adicionalidad.

Los países en vías de desarrollo (los que no están en el Anexo I) no están obligados a cumplir metas de reducción de emisiones, en virtud del principio de responsabilidades comunes pero diferenciadas. Sin embargo pueden aprovechar sus ventajas comparativas de costos a través del Mecanismo de Desarrollo Limpio. El objetivo es que los países del Anexo I hagan sus reducciones de emisiones donde el costo marginal sea más bajo.

Los proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio otorgan créditos computables contra las cuotas de emisión asignadas a los países del Anexo I. Estos créditos se denominan Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE) o bonos de carbono.

Se admiten los sumideros forestales pero limitados a proyectos de forestación y reforestación. A esto se lo denomina secuestro de carbono ya que el carbono de la atmósfera es absorbido por los árboles a través del proceso de fotosíntesis. No se admiten las inversiones en centrales nucleares.

Si bien el período de compromiso del Protocolo de Kyoto abarca los años 2008 a 2012, los proyectos de mecanismo de desarrollo limpio generan créditos computables a partir del año 2000. A esto se lo denomina "acción temprana".

### **3.1 Motivación del Mecanismo de Desarrollo Limpio.**

El Mecanismo de Desarrollo Limpio fue creado para combinar los intereses de los países tanto del Anexo I como los del no Anexo I. Existen claros beneficios para Desarrolladores de Proyectos usando el MDL ya que se pueden obtener tecnologías

ambientalmente bondadosas económicamente viables y derribar barreras que impedirían que el proyecto se llevara a cabo. A través del MDL se puede abrir un amplio mercado de oportunidades para proveedores de equipo.

Para desarrolladores de Proyectos en países del primer mundo, el MDL puede ser usado para mejorar inversiones de proyectos con menores emisiones de GEI. Lo anterior hace que una situación ganar-ganar para todas las Partes.

Un dato importante es que si el inicio de la actividad del proyecto es en el año 2000, podría ser elegible para validarse y registrarse como un Proyecto del MDL si es registrado antes del 31 de Diciembre del 2005. Esto significa que las RCE's son bancables por la entrada del MDL y que puede ser generado antes del 2008.

### **3.2 Procedimiento que sigue un proyecto MDL.**

Un proyecto del Mecanismo de Desarrollo Limpio debe seguir los siguientes pasos hasta obtener las Reducciones Certificadas de Emisiones:

1. Identificación del Proyecto. Esta tarea está a cargo del responsable o promotor del proyecto. Está conformada por los siguientes tres pasos:

- ❖ **Recepción y Revisión de la Nota Idea del Proyecto (PIN)<sup>3</sup>**

La idea de proyecto es revisada de acuerdo con los criterios básicos de elegibilidad del MDL. Si el PIN cumple con estos criterios, el proyecto será asignado a un especialista técnico del fondo de carbono para su seguimiento. De lo contrario, el proyecto será rechazado.

- ❖ **Preparación de la Nota Concepto del Proyecto (PCN)<sup>4</sup>**

Es una versión más elaborada de la Nota Idea de Proyecto. La preparación del PCN incluye el desarrollo de una línea de base preliminar, el cálculo de la reducción de emisiones esperadas, y una revisión inicial de los riesgos del proyecto. Este es el punto de partida para comenzar la inversión, realizar el estudio de factibilidad y determinar el mecanismo de financiamiento del proyecto.

- ❖ **Aprobación del País Anfitrión (formulario P34)<sup>5</sup>**

Este tercer documento, se elabora cuando se tiene certeza de que el proyecto es viable. Una vez que es hecho, se presenta a la autoridad nacional en MDL. De ser positiva la evaluación, la Autoridad Nacional del MDL, emite una Carta

<sup>3</sup> <http://www.fonamperu.org/general/mdl/documentos/pin.doc>

<sup>4</sup> <http://www.fonamperu.org/general/mdl/documentos/pcn.doc>

<sup>5</sup> <http://www.fonamperu.org/general/mdl/documentos/fp34.doc>



de Aprobación en la cual se indica que el proyecto contribuye al desarrollo sostenible del país.<sup>6</sup>

2. Documento de Diseño del proyecto (DDP). Conforme la preparación del proyecto avanza, el PCN evoluciona hacia los documentos de proyecto finales. El DDP es la base para la evaluación del proyecto por una entidad operacional. Los participantes (PP) deberán evaluar la actividad del proyecto propuesta y los requisitos de elegibilidad. El DDP incluirá secciones como: descripción del proyecto, metodología de la línea base y determinación de la adicionalidad, cálculo de las reducciones de emisiones, periodo de acreditación, protocolo de monitoreo y verificación, estudios sociales y de impacto ambiental, entre otras.
3. Aprobación por la Autoridad Nacional Designada (AND). El proyecto es aprobado por la AND en función de su contribución al desarrollo sostenible del país.
4. Validación. Consiste en la evaluación independiente del proyecto, la cual, es realizada por una Entidad Operacional Designada (EOD), en relación con los requisitos del MDL.
5. Registro. La Entidad Operacional solicita el registro del proyecto a la Junta Ejecutiva (JE) del MDL.
6. Implementación del Diseño del Proyecto (PP).
7. Vigilancia (Monitoreo). La vigilancia incluye la recopilación y archivo de todos los datos necesarios para medir o estimar las emisiones de GEI del proyecto MDL de la línea base y cálculo de reducción de emisiones debidas al proyecto. Es responsabilidad del desarrollador del proyecto.
8. Verificación y Certificación. La verificación consiste en una revisión independiente y periódica por una EOD de las reducciones de emisiones registradas de los resultados del monitoreo. La certificación es la constancia dada por la EOD confirmando las reducciones que el proyecto ha dado a lugar en un tiempo determinado.
9. Expedición de las RCE. La Junta Ejecutiva expide las RCE a partir de la certificación entregada por la Entidad Operacional.

### 3.3 Línea de base.

La Línea Base de un proyecto MDL es el escenario que representa razonablemente las emisiones antropogénicas por fuentes de GEI que se generarían en la ausencia de la actividad del proyecto propuesto. Una Línea Base debe abarcar las emisiones de todas las categorías de gases, sectores y fuentes listadas en el Anexo A del Protocolo de Kyoto dentro del ámbito del proyecto.

<sup>6</sup> En nuestro país es la SEMARNAT <http://cdm.unfccc.int/DNA> [M. en C. Miguel Ángel Cervantes Sánchez (miquel.cervantes@semarnat.gob.mx) Coordinador del Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones y captura de Gases de Efecto Invernadero. Tel: (52-55) 5490 0987 (52-55) 5490 2100 Ext.12056 Fax: (52-55) 5628 0794].

La Línea Base aplicada debe permitir:

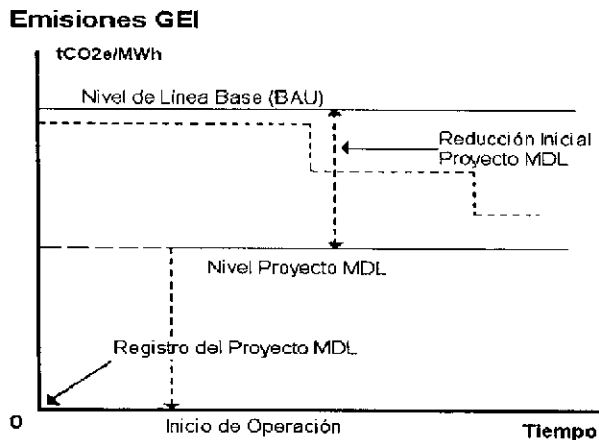
- Calcular las emisiones de GEI que cabría esperar en los escenarios habituales (BAU).
- Comparar las emisiones de GEI de la Línea Base con las del Proyecto, para tener una estimación de la reducción de emisiones que se espera lograr con el proyecto propuesto.
- Comprobar que el proyecto es adicional, constatando que no está en la Línea Base, para que ésta represente realmente lo que ocurriría en ausencia del proyecto MDL.

### 3.4 Principio de adicionalidad.

Un proyecto MDL es adicional si la reducción de emisiones antropogénicas de GEI por fuentes es superior a la que se produciría de no realizarse el proyecto MDL propuesto.

En la figura 3.1 se muestran que para un proyecto de generación de energía eléctrica, los niveles o tasas de emisión en tCO<sub>2</sub>e/MWh de la Línea Base y de un Proyecto MDL adicional adecuado a la misma, en el momento de arranque de la instalación MDL. Se incluye también la posible evolución tecnológica del sector eléctrico (línea punteada), evaluada en intervalos de siete años correspondientes a los periodos de acreditación. Nótese la disminución prevista de emisiones como consecuencia de la mejora en la eficiencia de las nuevas tecnologías, y el mayor uso de las energías renovables.

Figura 3.1 Esquema sobre la Adicionalidad de un Proyecto.



De la definición de adicionalidad se deduce que un proyecto MDL no puede formar parte de la base de referencia. Recíprocamente, un proyecto MDL no podrá estar incluido en un escenario inercial (BAU) del País de acogida.

Es de suma importancia comprobar si un proyecto es adicional, porque los créditos por la reducción de emisiones antropogénicas de GEI sólo pueden otorgarse a este tipo de proyectos. Por ello deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- El propósito de la prueba de adicionalidad es cerciorarse de que los proyectos que reciban créditos no se hubieran construido en los escenarios inerciales o habituales (BAU). Si el proyecto se hubiera desarrollado en cualquier caso, no se reducirían las emisiones por debajo de la base de referencia y, por lo tanto, no se justificaría la generación de RCE.
- El DDP, debe incluir una explicación de cómo y porqué el proyecto es adicional, y por lo tanto no puede estar incluido en la base de referencia.
- En el supuesto de una nueva metodología de base de referencia, los participantes deberán explicar cómo la metodología utilizada determina la base de referencia y, demostrar a través de la misma, la adicionalidad de un proyecto. Además, la metodología debe proporcionar los criterios suficientes para calcular las emisiones de la base de referencia, asegurando la consistencia entre la elaboración de la base de referencia y las fórmulas usadas para calcular las emisiones.

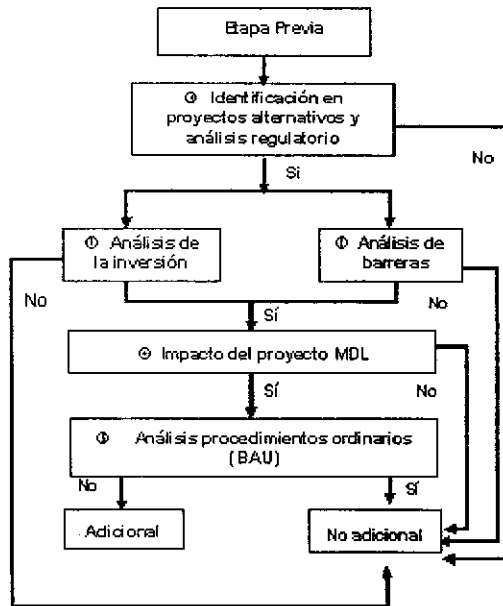
Los siguientes razonamientos pueden ayudar a demostrar la adicionalidad de un proyecto MDL:

- ❖ Un diagrama de flujo o serie de preguntas que conlleven a la disminución de las opciones de bases de referencia.
- ❖ Una comparación cuantitativa o cualitativa de diferentes opciones potenciales de la base de referencia, con una constatación de que una opción diferente al proyecto MDL tiene mayores posibilidades de llevarse a cabo.
- ❖ Una descripción, cuantitativa o cualitativa, de una o más barreras a que debe enfrentarse el proyecto MDL, tales como las que se indican a continuación:
  - De Inversión: ¿Existe una alternativa más viable financieramente que el proyecto MDL pero que conduce a mayores emisiones?
  - Tecnológicas: Una alternativa menos avanzada tecnológicamente que el proyecto MDL involucra un menor riesgo, debido a la mayor incertidumbre de la nueva tecnología o a que ésta cubre una menor proporción del mercado. Pero, la tecnología convencional conduce a mayores emisiones.
  - Escenarios inerciales (BAU): ¿Los escenarios inerciales, o las regulaciones, o los requerimientos políticos podrían llevar a la implementación de una tecnología con mayores emisiones que los del proyecto MDL?
  - Otras barreras: ¿Sin el proyecto MDL propuesto, y por razones específicas identificadas por los participantes, tales como barreras institucionales, de información limitada, escasos recursos directivos, poca capacidad organizativa,

pocos recursos financieros, o poca capacidad para asimilar nuevas tecnologías, las emisiones del País de acogida serían mayores?

En la figura 3.2 se presenta un esquema simplificado sobre pruebas de adicionalidad de un proyecto MDL.

Figura 3.2 Pruebas de la Adicionalidad de proyectos MDL.



Fuente: EB 16 Report. Annex 1

En algunos de los primeros proyectos<sup>7</sup> se utilizaron indicadores de la adicionalidad del proyecto:

- Indicador regulatorio: Se refiere a, si el proyecto es o no consecuencia obligatoria, directa o indirecta, de alguna ley o reglamento del país de acogida.
- Indicador de inversión: Se refiere a, si el proyecto hubiera o no ocurrido con las directrices normales de inversión de las Partes inversionistas, y en ausencia de asignación de valor a las reducciones de emisiones.
- Indicador tecnológico: Se refiere a, si el proyecto utiliza tecnologías o procedimientos que van más allá de la práctica habitual en la industria o sector correspondientes.

<sup>7</sup> Por ejemplo, en el proyecto piloto para el intercambio de emisiones *Greenhouse gas Emission Reduction Trading pilot* del Canadá – GERT, 2002

- **Indicador por eliminación de barreras:** Se refiere a, si el proyecto elimina o tiende a superar cualquier barrera de información, institucional u otras que hubiesen persistido en la base de referencia.

Estos indicadores son útiles todavía pues coinciden, en términos generales, con las barreras definidas por la JE.

Cabe señalar que este procedimiento aun y cuando es recomendado no se analizarán todos los criterios para concluir adicionalidad en esta investigación, como por ejemplo el de análisis de barreras y prácticas comunes. Sólo se considerarán los aspectos económicos, debido a que la normatividad MDL está en constante evolución.

### **3.5 Reducciones Certificadas de Emisiones (RCE's).**

Son unidades expedidas de conformidad con el artículo 12 del Protocolo de Kyoto y los requisitos que contiene, así como las disposiciones pertinentes de esas modalidades y procedimientos. Una RCE corresponde a una tonelada de dióxido de carbono equivalente ( $tCO_2e$ ), calculada usando los potenciales de calentamiento atmosférico (PCG).

Estas unidades son intercambiables con las demás unidades que generan los distintos compromisos y mecanismos del Protocolo de Kyoto, pudiendo utilizarse las mismas para justificar una parte del cumplimiento de los compromisos cuantitativos de reducción o limitación de GEI de las partes, Anexo I, o pudiendo comercializar con ellas en el comercio internacional de emisiones establecidos por el artículo 17 del Protocolo de Kyoto.

### **3.6 Fondo Prototipo Carbono (FPC).**

A efectos de impulsar el mercado de bonos de mercado, en el año 2000 el Banco Mundial constituyó un fideicomiso denominado "Fondo Prototipo Carbono". Fue el primer fondo de este tipo, y como su nombre lo indica, genera una bolsa de recursos financieros para servir como prototipo en el establecimiento de las bases de un mercado internacional de derechos de emisión. Además está destinado a invertir en proyectos de Implementación Conjunta y de Mecanismo de Desarrollo Limpio.

#### **➤ Oportunidades del Mercado de Carbono.**

El incipiente mercado de bonos de carbono ofrece interesantes oportunidades de negocios a quienes sean capaces de reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. Las oportunidades están por ejemplo en reducir las emisiones de carbono generados por el consumo de combustibles fósiles, el secuestro de carbono en sumideros forestales, reducir las emisiones de metano generados por el ganado en su digestión de los alimentos, la captura y reutilización del metano generado por los rellenos sanitarios, etc.

➤ **Principales actores en el mercado de carbono.**

Para que pueda llevarse a cabo un proyecto MDL es necesaria la intervención de varios actores con unas funciones claramente definidas, y debiendo cumplirse los denominados requisitos de elegibilidad, los principales actores del MDL y las funciones que deben desarrollar son los siguientes:

❖ **Participantes del Proyecto (PP).**

Pueden promover proyectos MDL las Partes Anexo II del Protocolo de Kyoto y entidades privadas y/o públicas autorizadas por la Parte correspondiente que participa bajo su responsabilidad. Las entidades privadas sólo pueden transferir y adquirir certificaciones provenientes del MDL si la Parte que da la autorización cumple con todos los requisitos de elegibilidad.

Así, el País Anexo I debe haber ratificado el Protocolo de Kyoto, haber nombrado su Autoridad Nacional Designada (AND), tener asignadas sus Unidades de Cantidad Atribuida, tener establecido un registro, y finalmente, haber elaborado sus inventarios de emisiones y absorción de los GEI. Por otro lado, el País No Anexo I debe así mismo haber ratificado el Protocolo de Kyoto, tener establecida una AND, y declarar que el proyecto en cuestión contribuye a su desarrollo sostenible.

❖ **Autoridad Nacional Designada (AND).**

Para poder participar en el MDL las Partes involucradas tienen que haber nombrado una AND, que estará encargada de dar la aprobación de este tipo de proyectos. Las AND son responsables igualmente de autorizar la participación voluntaria de entidades privadas o públicas en el MDL. En algunos países la AND se ha hecho cargo además de otras tareas como son, la preselección de proyectos, orientación a los promotores, formación, mantenimiento de un registro, etc.

❖ **Entidad Operativa Designada (EOD).**

Una EOD debe estar acreditada por la Junta Ejecutiva del MDL (JE) y designada por la conferencia de las partes (COP). Está encargada de la validación de proyectos MDL y de su presentación a la JE para su aprobación y registro, así como también para la verificación y certificación de las reducciones de emisiones de GEI. Sin embargo, salvo en el caso de proyectos de pequeña escala, una misma EOD no puede realizar la validación, verificación y certificación del ciclo del proyecto.

❖ **Junta Ejecutiva del MDL (JE)**

La Junta Ejecutiva (JE) es el órgano encargado de la supervisión del funcionamiento del mecanismo MDL, y está sujeta a la autoridad de la Conferencia de las Partes, en calidad de Reunión de las Partes (RP) del Protocolo de Kyoto. La JE está integrada por diez miembros procedentes de Partes del Protocolo de Kyoto, de la siguiente manera:

- Un miembro de cada uno de los cinco grupos regionales de las Naciones Unidas.

- Dos miembros procedentes de las Partes incluidas en el Anexo I.
- Dos miembros procedentes de las Partes no incluidas en el Anexo I.
- Un miembro en representación de los pequeños Estados insulares en desarrollo.

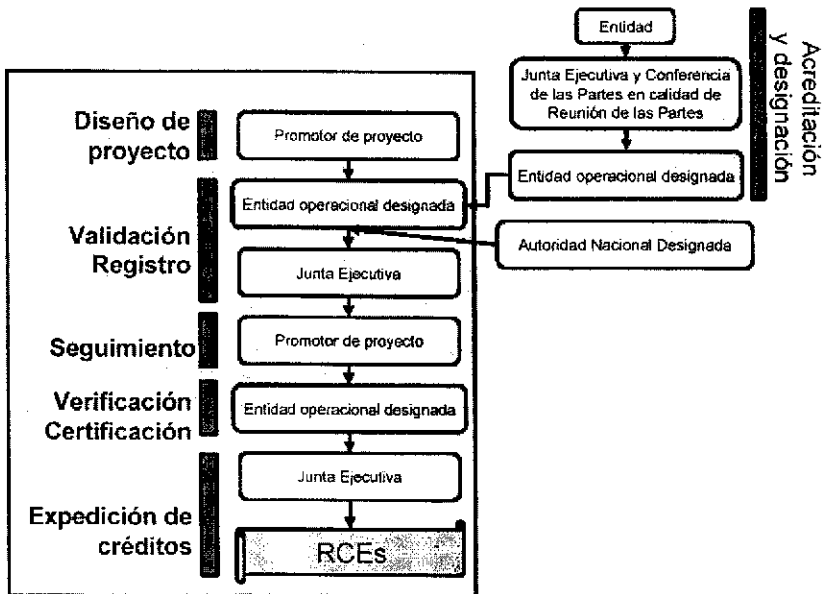
❖ País de Acogida.

El País de Acogida es en el que se implementa el proyecto MDL, además de ser una Parte no incluida en el Anexo II debe haber ratificado el Protocolo de Kyoto, y tener establecida una Autoridad Nacional Designada.

El País de Acogida tiene la potestad de aprobar el proyecto MDL, en función de su contribución a su desarrollo sostenible.

En la figura 3.3 se muestra un Diagrama con las fases y los actores del ciclo del proyecto de MDL hasta conseguir las RCE's.

Figura 3.3 Diagrama de las fases y los actores del ciclo del proyecto de MDL.



### 3.7 Requisitos de Elegibilidad.

Para que pueda desarrollarse un proyecto MDL, tanto las tecnologías o actividades comprendidas como los actores involucrados en el mismo, deben cumplir con los siguientes requisitos básicos de participación a lo largo de todo el ciclo del proyecto.

❖ País de Acogida.

- ✓ Haber ratificado el protocolo de Kyoto.
- ✓ Participar voluntariamente en el MDL (tanto el país participante como las entidades privadas o públicas autorizadas por él).
- ✓ Tener establecida una Autoridad Nacional Designada para el MDL.

❖ País Incluido en el Anexo I.

- ✓ Cumplir con requisitos para País de Acogida.
- ✓ Haber calculado su Cantidad Atribuida, es decir, tener fijado su tope cuantitativo de emisiones en toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> para el primer período de compromiso.
- ✓ Haber establecido un Registro Nacional en el cual se lleva la cuenta de todas las unidades generadas, asignadas y transferidas en el marco del protocolo de Kyoto.
- ✓ Disponer de un Sistema Nacional para la estimación de emisiones.
- ✓ Haber entregado, en su debido tiempo, el último y más reciente inventario de emisiones.

❖ El Propio Proyecto.

- ✓ Los Proyectos MDL deben generar reducciones de emisiones de GEI en un país en desarrollo que sean reales, medibles y a largo plazo.
- ✓ Las reducciones de emisiones de GEI generadas en el proyecto deben ser adicionales.
- ✓ Los proyectos MDL deben contribuir al desarrollo sostenible del País de Acogida. El Protocolo de Kyoto especifica que uno de los principales objetivos del MDL es la contribución al desarrollo sostenible de las Partes no Anexo I.



### 3.8 Desarrollo sostenible.

Se persigue que los proyectos MDL contribuyan al desarrollo sostenible de los países que van a recibir las inversiones en tecnologías limpias. Sin embargo, los Países de Acogida pueden elegir el modelo de desarrollo sostenible que deseen seguir, ya que, no existe una directriz clara para la aplicación de este requisito, basta con una declaración por su parte en el sentido de que la tecnología o actividad propuesta realiza dicha contribución, es decir, es prerrogativa del país receptor decidir si un proyecto MDL es adecuado para alcanzar este desarrollo sostenible.

Los criterios utilizados para este fin no son claros ni están suficientemente perfilados. Siguiendo modelos anteriores empleados por la ONU, existen los siguientes indicadores:

- **Desarrollo ambiental sostenible:** reducción de emisiones de contaminantes, menor deterioro de recursos naturales, la conservación y preservación de los recursos naturales locales y de la biodiversidad o la contribución a la puesta en práctica de políticas medioambientales.
- **Desarrollo social sostenible:** Empleo generado, transferencia de tecnología, reducción de la pobreza, acceso a la energía, desarrollo de las infraestructuras, en resumen a la mejora de la calidad de vida.
- **Desarrollo económico sostenible:** como son la aportación del proyecto a los ingresos de entidades locales, la creación de un impacto positivo sobre la balanza de pagos del País de Acogida, o a la realización de transferencias tecnológicas, efecto sobre el PIB y el PNB, en los tipos de interés, etc.

En todo caso, debe comprobarse si el país anfitrión ha definido indicadores o criterios al respecto.

- ✓ Los proyectos deben ser compatibles con cualquier requisito legal del País de Acogida
- ✓ Las partes deben evitar los certificados generados por proyectos que utilicen la energía nuclear.
- ✓ No podrán utilizarse fondos provenientes de la Ayuda Oficial al Desarrollo para financiar proyectos MDL.
- ✓ Se debe promover una distribución geográfica equitativa de las actividades de estos proyectos para conseguir un desarrollo limpio en los ámbitos regional y subregional.

### 3.9 Definición de los proyectos de pequeña escala.

Se han tipificado tres tipos de proyectos; energías renovables, mejora en la eficiencia energética y proyectos que reducen las emisiones antropogénicas de GEI. Todos ellos están sujetos a unos límites máximos y a las siguientes categorías:

Tipo I: Proyectos de energías renovables con una capacidad máxima de producción equivalente de 15 MW (o equivalente apropiado)

Tipo II: Proyectos de mejora de la eficiencia energética que reduzcan el consumo de energía, por el lado de la oferta y/o de la demanda, con un máximo equivalente de 15 GWh/año

Tipo III: Otros proyectos que reduzcan las emisiones antropogénicas directas en menos de 15,000 tCO<sub>2</sub>e por año.

Para cada tipo se ha elaborado una lista de actividades clasificadas. Un proyecto sólo puede acogerse a una categoría; las categorías son mutuamente excluyentes.

En las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se presentan las clasificaciones de los tres tipos de proyectos de pequeña escala y ejemplos de tecnologías utilizadas para cada uno de ellos.

Tabla 3.1. Clasificación de actividades de proyectos Tipo I: Energías renovables.

Categorías de las actividades de proyectos	Ejemplos – Tecnologías utilizadas.
A. Generación eléctrica para el consumidor /hogar (residencial)	Energías renovables que producen electricidad para uso residencial, como placas solares, bombas de agua solares o cargadores de baterías eólicas.
B. Energía mecánica para el consumidor/empresa	Tecnologías renovables para el suministro de energía mecánica a usuarios o empresas que necesitan una pequeña cantidad de energía: bombas de energía solar o térmica, molinos de agua y viento, etc.
C. Energía térmica para el consumidor final	Suministro de energía térmica sustituyendo fuentes de combustibles fósiles o de biomasa no renovable; calentadores de agua solares, cocinas solares y sistemas de cogeneración por biomasa. (hasta 45 MWt).
D. Generación de electricidad para suministro de una red de distribución	Fuentes renovables que suministran electricidad a una red de distribución eléctrica abastecida por al menos una fuente de generación con combustible fósil o combustión de biomasa no renovable. El límite de 15MW aplica sólo a la componente renovable. (cogeneración hasta 45 MWt).

Tabla 3.2. Clasificación de actividades de proyectos Tipo II: Eficiencia energética.

Categorías de las actividades de proyectos	Ejemplos – Tecnologías utilizadas.
A. En la oferta: actividades de transporte y distribución	Aumento de voltaje en una línea de transporte, mejora de aislamiento en tuberías de un sistema de calefacción urbana. Mejora de sistemas de transporte/distribución o ampliaciones.
B. En la oferta: generación de electricidad/calor	Actuaciones de mejora en plantas de generación térmica fósil, cogeneración, reducción de consumos, combustible, etc.
C. Eficiencia energética en la demanda	En equipos como lámparas, generadores, motores, ventiladores, sustituciones o instalación de equipos nuevos.
D. Medidas de eficiencia y sustitución de combustibles en instalaciones industriales	Motores eficientes, cambios de combustibles, mejoras rendimiento, medidas en procesos industriales (hornos de acero, secado de papel, etc.)
E. Medidas de eficiencia y sustitución de combustibles en instalaciones agrícolas	Reducción del consumo energético por unidad de terreno, reducción del uso y cantidad de combustible en maquinaria agrícola, cambio de maquinaria, etc.

Tabla 3.3. Clasificación de actividades de proyectos Tipo III: Reducción de emisiones.

Categorías de las actividades de proyectos	Ejemplos y Tecnologías utilizadas
A. Agricultura	Reducción de metano en cultivos de arroz, disminución de los residuos animales o su utilización para generación eléctrica.
B. Sustitución de combustibles fósiles	Cambio de combustibles fósiles en la producción de energía para uso industrial, residencial, y comercial. Si el cambio de combustible es parte de una actividad del proyecto centrada en la mejora del rendimiento energético, la actividad del proyecto debe incluirse en las categorías II.D o II.E.
C. Sector del transporte	Mejoras en la eficiencia de los carburantes, cambio de vehículos y/o de tipo de carburantes, fomento del transporte público o reducción de la frecuencia en los itinerarios.
D. Recuperación de metano	Recuperación del metano en las minas de carbón, industria agroalimentaria, instalaciones de tratamiento de aguas residuales, vertederos, etc.
E. Eliminación de metano	Eliminación del metano procedente de la descomposición de la biomasa o de otra materia orgánica, a través de su combustión controlada sin recuperación.

### 3.10 Período de vida útil del proyecto.

La vida útil del proyecto es el tiempo durante el cual se ejecuta la actividad de proyecto.

### 3.11 Selección del período de acreditación.

Se entiende por período de acreditación el tiempo en que una EOD verifica y certifica las reducciones de emisiones de GEI debidas a la actividad del proyecto, a fin de que la JE pueda expedir las RCE's. El período estimado de vida del proyecto no siempre, coincide con el período de acreditación. El período de acreditación sólo podrá comenzar después de la fecha de registro del proyecto MDL. En casos excepcionales, la fecha de comienzo del período de acreditación puede ser anterior a la fecha de registro del proyecto, tal como se dispone en los párrafos 12 y 13 de la decisión 17 de la COP 7.

En los Acuerdos de Marrakech se establecen dos posibles periodos de acreditación:

- **Período de Acreditación Renovable.**  
Es de un máximo de siete años, renovable como máximo dos veces, siempre que, para cada renovación, una EOD determine si todavía es válida la línea base de referencia original del proyecto o si ha sido actualizada teniendo en cuenta nuevos datos, cuando proceda, e informe de ello a la Junta Ejecutiva.
- **Período de Acreditación Fijo.**  
Es de un máximo de diez años sin opción de renovación.

Una vez que hemos explicado los requisitos y procedimientos que necesita cumplir un proyecto para que sea considerado MDL, es el momento de conocer los principios y el desempeño de un tipo de proyecto que puede considerarse para reducir emisiones de GEI, a través de la extracción de biogás de un relleno sanitario.



## CAPÍTULO 4

# PLANTAS DE ELECTRICIDAD CON BASE A BIOGÁS

#### 4.1 Relleno sanitario.

El relleno sanitario es un lugar previamente tratado en donde se construyen celdas impermeables y se depositan residuos sólidos, sin crear molestias o peligros para la salud pública o su seguridad, los cuales se esparcen y compactan, reduciéndolos al menor volumen posible. Posteriormente se cubren con una capa de tierra y se compactan nuevamente. Generalmente cuentan con zanjas alrededor del sitio que servirán como canales de desvío de las descargas pluviales.

En este proceso lo que se busca es aislar los desechos y controlar los lixiviados<sup>8</sup> y el biogás que se generan en el proceso de descomposición de la basura y filtrado de agua de lluvia.

Cuando las celdas alcanzan su máxima capacidad se cierran con alguna cubierta que favorezca el crecimiento de vegetación. Es importante que durante su vida útil y después de la clausura de las celdas, se implemente un programa de monitoreo ambiental para dar seguimiento y verificar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas y la eficiencia de los sistemas de tratamiento de los líquidos lixiviados y el biogás.

#### Procesamientos aplicables a basuras.

Podemos clasificar los procesos en:

##### ➤ **Procesamientos mecánicos.**

Trituración. Divide, mezcla y homogeniza la basura favoreciendo:

- La descomposición bioquímica
- El condensamiento y la estabilidad mecánica de los rellenos
- La uniformidad y control de la acción térmica.

Consecuentemente, puede ser un proceso auxiliar para compostificación, relleno sanitario, pirolisis e incineración.

Compactación. Disminuye los espacios vacíos condensando la basura a bajo costo, por lo que constituye un proceso auxiliar en el relleno sanitario, además de tener alta importancia económica en la recolección de basura.

Clasificación. Consiste en la separación de materiales constituyentes de la basura por interés económico en ellos o en la mayor productividad de un procesamiento biológico o térmico subsecuente. Ejemplo: se separan materiales "ligeros" (plásticos, papeles) para ser incinerados o para que no perturben el proceso biológico de compostificación.

<sup>8</sup> Lixiviados: líquidos que se generan por la degradación de la materia orgánica y por la infiltración de agua en el relleno, son altamente contaminantes.

➤ **Procesamientos térmicos.**

Incineración. Reduce la basura urbana a cerca del 10% de su masa inicial, por lo que también suele ser considerada como una forma de disposición. Tal reducción es obtenida en incineradores de gran tamaño (más de 500 t/día) operando a temperaturas del orden de los 1,000 °C, provistos de parrillas móviles, inyectores de aire, controladores de quema y partes complementarias tales como caldera acuo- tubular, filtro de alto rendimiento y chimenea.

Pirólisis. La descomposición térmica en ambiente carente de oxígeno libre ocurre a temperaturas inferiores a las de incineración, produciendo líquidos o gases de alto contenido energético sin contaminación atmosférica apreciable. La cantidad de residuos es mayor que en la incineración dependiendo del proceso. La tecnología aplicable a pirólisis en basura urbana está en fase de desarrollo.

➤ **Procesamientos biológicos.**

Aeróbico. Es el más higiénico y productivo para compostificación y para estabilización del relleno sanitario puesto que sus productos principales son agua, dióxido de carbono y calor, siendo éste suficiente para elevar la temperatura de la masa a nivel fatal para microorganismos patógenos, huevos y gérmenes. La basura presenta muchos espacios llenos de aire y humedad elevada conteniendo oxígeno disuelto. El ambiente es, por consiguiente, favorable a la actividad de bacterias y otros microorganismos aeróbicos y facultativos, que oxidan la materia orgánica produciendo agua, dióxido de carbono, calor y compuestos nitrogenados, en fases controlables a través de indicadores como la temperatura y el pH. La humedad óptima es de 40 a 60% en el ambiente.

Anaeróbico. Es más lento, disipa poco calor y descompone la materia en compuestos orgánicos más simples- además de minerales- teniendo enorme importancia la producción de metano (CH<sub>4</sub>), gas de elevado poder energético (8,900 kcal/m<sup>3</sup>n). En la masa de basura el oxígeno se va consumiendo en las reacciones aeróbicas, transformándose en un ambiente favorable a los microorganismos anaeróbicos y facultativos, sobre todo bacterias. Determinados grupos metabolizan las proteínas, los hidratos de carbono y lípidos en un ambiente de elevado contenido de humedad, produciendo ácidos grasos, acético y otros de bajo peso molecular en la fase denominada por esta razón ácida, reconocida por el bajo pH en el ambiente y por la emanación de gases malolientes como el sulfídrico (H<sub>2</sub>S) y mercaptanos<sup>9</sup>.

El mal olor es una de las limitaciones en el proceso anaeróbico. Sobre los ácidos orgánicos formados actúan metano- bacterias que los descomponen en metano y dióxido de carbono. La disminución del contenido ácido se revela en la elevación del pH, indicador de esta fase importante e inestable en la cual la acidez ambiental,

---

<sup>9</sup> Compuestos fuertemente olorosos de carbono, hidrógeno y azufre que se encuentran en el gas y en el aceite. Algunas veces se agregan al gas natural por razones de seguridad.

temperatura y presencia de sustancias tóxicas (residuos químicos y oxígeno) afectan mucho la productividad metanogénica.

Los procesos biológicos generan dos productos importantes:

- Metano, también llamado biogás o gas bioquímico.
- Compostado para suelo agrícola.

Metano. Es la más pequeña de las moléculas de los hidrocarburos, con un átomo de carbono y cuatro átomos de hidrógeno. Es un gas ligero, sin color, sin olor, flamable bajo condiciones normales. El metano es el primer miembro en la serie de alcanos (parafinas). Resulta en el proceso anaeróbico ya descrito.

Composto: Es un material tipo "humus", bioquímicamente estable, constituido por materia orgánica, mineral y cerca de 40% de agua, y pH neutro o poco alcalino. Resulta de la descomposición aeróbica y anaeróbica. Del proceso aeróbico resulta la ventaja de la esterilización por el calor y del anaeróbico resulta un compostado más alcalino y de menor contenido de nitrato. Debido a su estructura el composto, aplicado en cantidad conveniente, es benéfico a los suelos duros y arenosos. Retiene agua y la transfiere gradualmente al suelo, humedeciéndolo por un largo período. Contiene una pequeña cantidad de nutrientes en solución coloidal que pueden ser absorbidos por vegetales. Puede retener en su estructura nutrientes adicionados por el agricultor, evitando que se pierdan mediante escurrimiento en los suelos duros o por infiltración en los arenosos. Los procesos industriales de compostificación son, casi todos, aeróbicos porque son más rápidos y relativamente inodoros.

Es importante para la realización de un relleno sanitario lo siguiente:

- La recolección
- Las rutas
- Tamaño y número de unidades
- El porcentaje de cobertura
- Las políticas de recolección
- La planta de transferencia, etc.

### **Tipos de rellenos sanitarios.**

El factor clave para diseñar un relleno sanitario es el volumen. De acuerdo con las características y la cantidad de basura que es generada en un municipio es el tipo de relleno sanitario que se necesitará. Actualmente los rellenos sanitarios que más se utilizan en los países en desarrollo como México son:

- A. El relleno sanitario tradicional.
- B. El relleno sanitario manual.



### A. Relleno sanitario tradicional.

Esta tecnología tiene como objetivo que la disposición final de la basura generada a nivel municipal, no cause perjuicio al ambiente y molestias o peligros para la salud y seguridad pública. El proceso que se sigue en un sitio de este tipo es el siguiente:

- Se prepara el sitio de disposición final. Esto significa que la superficie del suelo de las celdas donde se depositará la basura deberá cubrirse por una capa de plástico de alta densidad que funcionará como una olla que no permitirá que los líquidos lixiviados generados en el proceso de degradación de la basura se infiltren al suelo.
- Se deben construir otras obras adyacentes de control y monitoreo, de observación (por ejemplo para el agua subterránea) e instalaciones para la recolección y tratamiento de los líquidos lixiviados.
- Una vez que el terreno está preparado, los componentes principales del relleno sanitario están construidos y la operación autorizada, los residuos sólidos de la población se recolectan y se trasladan al relleno sanitario. Los residuos sólidos son descargados y desplazados hacia las celdas de depósito, la basura se esparce con maquinaria pesada en forma homogénea en capas delgadas y se compacta hasta obtener una superficie uniforme. Esta operación se repite sobre cada capa hasta obtener la altura predefinida para la celda.
- Una vez terminada la celda, ésta se cubre con una capa de tierra, y se compacta, siguiendo el mismo procedimiento con la basura de tal forma que toda quede cubierta para impedir la dispersión de materiales ligeros y evitar la proliferación de fauna nociva. (roedores, aves, perros, gatos, etc.).
- Se debe esperar de 2 a 3 meses para construir nuevas celdas sobre las anteriores para favorecer la descomposición y acelerar el asentamiento del relleno. Después de dos años el proceso de generación de asentamientos se reduce y prácticamente desaparecen a los cinco años.

Adicionalmente se tienen que realizar otras operaciones y medidas que se deben continuar por lo menos hasta 25 años después de la clausura del relleno sanitario:

- ❖ Recuperación, extracción y tratamiento de biogás y de los lixiviados.
- ❖ Monitoreo de biogás, de los lixiviados y de los mantos acuíferos.
- ❖ Captación de aguas pluviales.

### B. Relleno sanitario manual.

Esta técnica de disposición final de residuos constituye una alternativa apropiada para el manejo ambiental de los residuos en áreas de menos de 40,000 habitantes que no pueden adquirir equipo pesado para el manejo de un relleno sanitario tradicional.

El relleno sanitario manual cuenta con ciertos elementos del relleno sanitario tradicional como son la cerca perimetral (generalmente hecha de arbustos y plantas), el drenaje periférico para la desviación de aguas pluviales, la impermeabilización, el drenaje de líquidos lixiviados, el sistema de evacuación del biogás. Para su operación se utilizan

generalmente instrumentos de uso manual, pero para la preparación del sitio es necesario el uso de maquinaria pesada.

- ❖ Para determinar la construcción, la dimensión y la amplitud del sitio, se toma en cuenta la generación de residuos sólidos y la vida útil necesaria de la futura planta. Para minimizar el impacto ambiental, se debe considerar el mantener cierta distancia de la próxima zona urbana y de las aguas superficiales.
- ❖ Se debe adecuar el terreno, construir las vías de acceso para facilitar la llegada de vehículos de transporte y colocar un cerco perimetral para evitar que se vuele basura ligera. La siembra de una cerca de arbustos y/o árboles puede ayudar a ocultar el sitio a largo plazo.
- ❖ La construcción de un drenaje periférico ayudará a disminuir el ingreso de la lluvia al sitio y limitar la generación de los líquidos lixiviados.
- ❖ Se debe preparar el suelo de soporte con algún material de cobertura, si esto es difícil es favorable remover las capas superiores del terreno.
- ❖ Dentro del relleno se construye un sistema de drenaje de líquidos lixiviados acomodando ramas y piedras en zanjas. Se tapan las zanjas con pasto, ramas secas o un geotextil (capa de plástico de alta densidad) para permitir la infiltración de líquidos y retener las partículas finas que trae el mismo.
- ❖ Un elemento fundamental del relleno sanitario manual es la construcción del sistema de evacuación de biogases para dejar salir el gas producido en el relleno. Un sistema de ventilación vertical en forma de torres de piedra o de tubería perforada en función de chimeneas o ventilas es necesario.
- ❖ Es importante instalar una caseta de vigilancia en la entrada del sitio de disposición final. Para operar un relleno sanitario manual de alrededor de 10 ton/día se requieren aproximadamente de 5 trabajadores.

La disposición regulada de desechos en un relleno tradicional impide que haya plástico volando, que se produzca fauna nociva y que se originen enfermedades, al igual que para un relleno manual.

Comparado con el relleno sanitario tradicional, el de operación manual tiene un riesgo de infiltración de lixiviados al subsuelo y en consecuencia la contaminación es mayor, ya que generalmente se impermeabiliza con capas de arcilla o tepetate y sin la capa de plástico de alta densidad. Al compararlo con la disposición a cielo abierto en terrenos o barrancas (tiraderos), el relleno manual es un avance significativo y aceptable para los rellenos en pequeñas poblaciones.

### **Ventajas**

- ✓ La utilización de plástico de alta densidad en la construcción de las celdas asegura impermeabilidad, evitando la contaminación del suelo o del agua superficial y subterránea.
- ✓ El recubrimiento constante de la basura reduce los malos olores y la proliferación de fauna nociva.
- ✓ Disminución de riesgos de propagación de enfermedades infecciosas.

- ✓ El biogás resulta un subproducto que puede convertirse en un recurso muy atractivo en la generación de energía eléctrica.

### Limitaciones

- ✓ Difícil aceptación social ante la construcción de este tipo de instalación.
- ✓ Lineamientos urbanos (NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-083-ECOL-1996, ver anexo B de esta tesis).

## 4.2 Caracterización de gas de relleno sanitario y su dinámica de producción.

En general todo tipo de residuos sólidos urbanos y domésticos, por su contenido de materia orgánica son utilizados para fines energéticos mediante procesos de transformación de biomasa residual. El término biomasa se refiere a aquel producto de grupos energéticos, materia orgánica, residuos, todos ellos de carácter renovable, que han tenido su origen como consecuencia de un proceso biológico o de fotosíntesis y que son susceptibles de ser transformados por medios biológicos o térmicos para generar energía.

Se da el nombre de biogás o Gas de Relleno Sanitario (GRS) a la mezcla gaseosa producida por la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas (ausencia de oxígeno) y cuyos principales componentes son el metano ( $\text{CH}_4$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que se producen como resultado de la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire por la acción de un microorganismo.

El biogás es una mezcla de gases que está compuesta básicamente por:

- Metano ( $\text{CH}_4$ ): 40 - 70 % vol.
- Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ): 30 - 60 % vol.
- Otros gases : 1 - 5 % vol.

Incluyendo:

- Hidrógeno ( $\text{H}_2$ ): 0 - 1% vol.
- Sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ): 0 - 3 % vol.

El GRS es generado como resultado de procesos físicos, químicos y microbiológicos que ocurren dentro de los residuos. Debido a la naturaleza orgánica de los residuos húmedos, el proceso microbiológico es el que gobierna el proceso de generación. Estos procesos son sensibles a su entorno y por lo tanto, existe una amplia gama de condiciones naturales y propiciadas por el hombre que afectan la población microbiana y consecuentemente, la tasa de producción del GRS. Estudios de corto plazo adelantados en rellenos de gran tamaño, en los que se usaron datos generados mediante pruebas de extracción de GRS, indican un rango de producción del GRS entre 0.05 y 0.40  $\text{m}^3$  de GRS por kilogramo de residuo dispuesto en el relleno. La masa de residuo representa tanto los materiales sólidos (75-80% por masa) como la humedad (20-25% por masa). Este rango depende del contenido orgánico del residuo colocado en el relleno.

La composición del residuo es el factor más importante en la evaluación del potencial de generación de GRS de un sitio específico. El máximo volumen del GRS depende de la cantidad y contenido orgánico dentro de la masa de residuo debido a que es precisamente la descomposición de los residuos orgánicos la fuente de todo el GRS que puede generar el relleno. Otros factores que influyen en la tasa de producción del GRS son el contenido de humedad; contenido de nutrientes; contenido de bacterias; nivel de pH; temperatura; y el diseño y planes de operación del sitio específico.

La humedad es el principal factor que limita la tasa de descomposición del residuo. Las condiciones de humedad dentro del relleno son una función de muchos factores. Los rellenos son típicamente construidos y llenados siguiendo un patrón secuencial por capas. Este aspecto es importante para comprender cómo la humedad se mueve dentro y a través del residuo. El efecto de la disposición por capas tiende a producir sustancialmente diferentes características de flujo en relación con el movimiento de lixiviados y a la infiltración de agua dentro del relleno. El control del contenido de humedad y de los otros factores que influyen en la población de bacterias que producen el GRS puede tener un gran impacto en el porcentaje del GRS total que es producido, y así mismo en la tasa a la cual es producido. Así mismo, la tasa de producción del GRS puede en cierta forma ser objeto de control mediante sistemas de manejo de residuos bien diseñados.

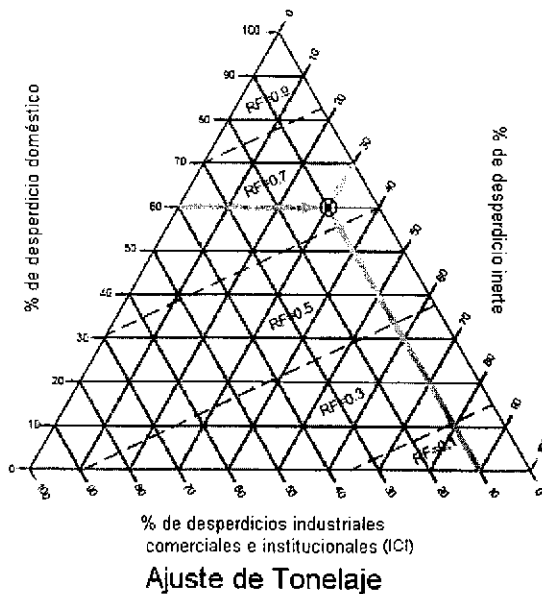
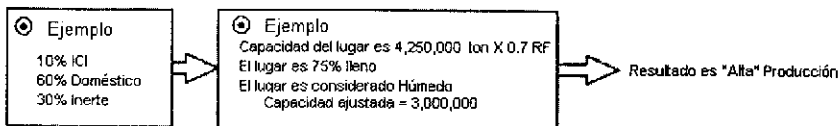
Para efectos de una caracterización inicial del sitio, la producción del GRS puede ser simplificada en función del volumen, edad y tipo de residuo, y de su contenido de humedad. El volumen de gases de efecto invernadero (GEI) es directamente proporcional al potencial de generación del GRS. Esto también tiene repercusiones en otros potenciales impactos relacionados con olores y seguridad pública. En general, entre más gas sea producido mayor será la probabilidad de que surjan problemas relacionados con salud, seguridad y molestias por olores; pero al mismo tiempo, esta situación conlleva una factibilidad económica más favorable para la utilización del GRS.

En la figura 4.1 se presenta una metodología para caracterizar de un sitio con base en su potencial de producción de GRS. El primer paso es determinar el factor de ajuste del tonelaje basado en la composición del residuo. Este factor de corrección representa la proporción de residuos inertes en el relleno que no producen GRS, y la proporción de residuos industriales/comerciales/institucionales (ICI) que producen menos GRS que un residuo doméstico típico. El factor de ajuste es determinado en el diagrama triangular que se muestra en la figura 4.1 con base en la proporción de los tipos de residuos que están ya depositados o que van a ser recibidos en el relleno. La capacidad del relleno se multiplica por el factor de ajuste de tonelaje dando como resultado una capacidad ajustada del sitio.

El relleno puede ser entonces clasificado como seco o húmedo. Un relleno seco se descompondrá más lentamente que uno húmedo y por consiguiente la tasa de producción del GRS será más baja, y el tiempo de producción más largo. Entre los factores que inciden en el contenido de humedad de un relleno están la precipitación y temperatura del sitio, el tipo de cobertura del relleno, las condiciones de la cobertura (por ejemplo, pendiente, continuidad), el tipo de sistema de recolección de los lixiviados, y el tipo de membrana impermeabilizante del relleno. La clasificación del sitio como seco o húmedo depende principalmente de la cantidad de precipitación que se infiltra dentro de la masa de residuo. Una aproximación conservativa para clasificar un sitio como seco o húmedo es la que se basa en el promedio anual de lluvias. Un relleno en el que una porción significativa del residuo se localiza dentro de un medio combinado de agua

subterránea/lixiviados puede ser considerado como un sitio húmedo. Los sitios localizados en áreas con precipitaciones menores de 500 mm/año, se clasifican como sitios relativamente secos; más de 500 pero menos de 1000 mm/año, como sitios relativamente húmedos; y los sitios ubicados en áreas con mas de 1000 mm/año, como sitios húmedos.

Figura 4.1 Metodología para caracterizar de un sitio con base en su potencial de producción de GRS.



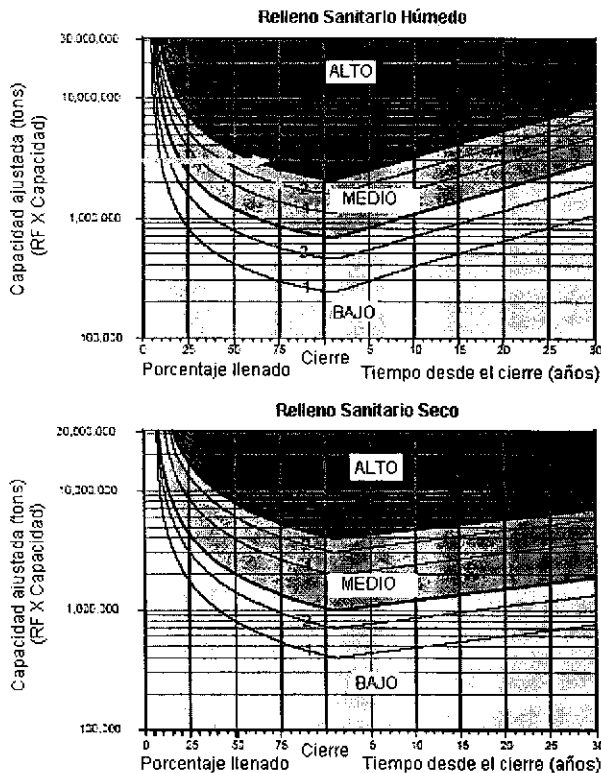
**Nota:** Un relleno sanitario es considerado húmedo o menos de que sea equipado con una cubierta de permeabilidad baja o que se encuentre en un área en donde la precipitación anual sea menor que 535 mm

La capacidad ajustada del sitio se localiza en el eje izquierdo del cuadro para rellenos húmedos o secos. Este tiene que ver con el efecto que el tamaño del sitio (pequeño, mediano, grande) tiene en la producción de gas. El estado actual de utilización del sitio en cuanto a llenado se localiza en el eje inferior. Este se define como el porcentaje de llenado en que está el sitio o el número de años transcurridos desde el cierre del mismo.

La producción de GRS se determina mediante la intersección de la capacidad ajustada del sitio y el estado actual de llenado. La producción de gas se clasifica como

"alta", "media" o "baja". Cada categoría está definida mediante cifras que indican un nivel creciente de severidad dentro de la categoría. La producción máxima de GRS típicamente ocurre dentro de los dos años después del cierre del sitio, dependiendo de si el sitio tuvo un programa de disposición moderadamente uniforme. En la planeación y evaluación de la necesidad de instalar controles es muy importante considerar la futura producción del GRS. La figura 4.2 muestra cómo la producción del GRS en un sitio se incrementa en la medida que se va llenando, y cómo luego disminuye lentamente después de su cierre.

Figura 4.2 Producción de GRS incrementa y luego disminuye.



Otros asuntos relacionados con la producción del GRS que son materia de evaluación, incluyen los riesgos por la migración subterránea de los GRS y el impacto de los mismos en la calidad del aire.

Los principales factores que inciden en la distancia de migración del gas son la permeabilidad del suelo adyacente al relleno y el tipo de cobertura final superficial alrededor del mismo. Generalmente, entre mayor es la permeabilidad del suelo adyacente al relleno, mayor es la distancia de migración. El contenido de agua en el suelo tiene

también una importante incidencia sobre su permeabilidad con respecto al flujo de GRS. En la medida que el contenido de agua se incrementa, la transmisividad del medio disminuye. Adicionalmente, el tipo de cobertura en la superficie del terreno afecta la ventilación del GRS hacia la atmósfera. Superficies pavimentadas o congeladas limitan la ventilación del gas a la atmósfera y por lo tanto incrementan la distancia potencial de migración. Una membrana impermeable en un relleno puede reducir inmensamente el potencial de migración subterránea. Así mismo, la presencia de suelos heterogéneos alrededor del sitio o tuberías de alcantarillado y otros servicios públicos enterrados incrementan la distancia potencial de migración a lo largo de estos ductos y corredores. Por lo tanto, estos factores deben ser considerados cuando se evalúe el potencial de migración subterránea de un sitio en particular.

Otros asuntos relacionados con la producción del GRS que son materia de evaluación, incluyen los riesgos por la migración subterránea de los GRS y el impacto de los mismos en la calidad del aire.

Los principales factores que inciden en la distancia de migración del gas son la permeabilidad del suelo adyacente al relleno y el tipo de cobertura final superficial alrededor del mismo. Generalmente, entre mayor es la permeabilidad del suelo adyacente al relleno, mayor es la distancia de migración. El contenido de agua en el suelo tiene también una importante incidencia sobre su permeabilidad con respecto al flujo de GRS. En la medida que el contenido de agua se incrementa, la transmisividad del medio disminuye. Adicionalmente, el tipo de cobertura en la superficie del terreno afecta la ventilación del GRS hacia la atmósfera. Superficies pavimentadas o congeladas limitan la ventilación del gas a la atmósfera y por lo tanto incrementan la distancia potencial de migración. Una membrana impermeable en un relleno puede reducir inmensamente el potencial de migración subterránea. Así mismo, la presencia de suelos heterogéneos alrededor del sitio o tuberías de alcantarillado y otros servicios públicos enterrados incrementan la distancia potencial de migración a lo largo de estos ductos y corredores. Por lo tanto, estos factores deben ser considerados cuando se evalúe el potencial de migración subterránea de un sitio en particular.

### **El Modelo Scholl-Canyon.**

Los modelos matemáticos son herramientas útiles y económicas para la estimación del potencial de generación del GRS en el sitio. Los resultados del modelo pueden también ser usados para evaluar los riesgos potenciales asociados a la migración/emisión del GRS, y para evaluar la factibilidad del proyecto de administración del GRS.

Hay disponibles numerosos modelos para calcular la producción del GRS. Todos estos modelos pueden ser usados para elaborar una curva de generación que permita predecir su comportamiento y cambios a lo largo del tiempo. La totalidad del gas existente y la tasa a la cual es generado puede variar de alguna manera según los diferentes modelos que se usen, no obstante, el parámetro de entrada que es común a todos ellos es el de la cantidad de residuo que es degradable. Los demás parámetros de entrada pueden variar dependiendo del modelo que se use, pero por lo general, estos están determinados por un número de variables incluyendo las que inciden directamente en la generación del GRS, incertidumbres en la información disponible sobre el sitio, y la forma en que la operación de la extracción del GRS afecta la generación en sí misma, en los casos en que se induce infiltración de aire. Otro factor importante es el espacio de tiempo

que se asume entre el momento de la disposición del residuo y el comienzo de la descomposición anaeróbica o fase metagénica dentro de la masa de residuo.

La heterogeneidad y naturaleza variable de todos los rellenos conlleva una dificultad que es inherente a la confiabilidad de los datos que se recolectan sobre el sitio, la cual está ligada a la disponibilidad de un continuo desembolso de recursos para predecir dicha actividad. Cualquier resultado del modelo será aceptable en la medida que lo sean los datos de entrada, aunque muchas veces estos parten de hipótesis generales en cuanto a la estimación inicial de las cantidades y tipos de residuo. Por lo tanto, es recomendable usar un modelo simple que utilice pocos parámetros y que puedan ser razonablemente asignados de acuerdo con las condiciones específicas del sitio. La predicción del resultado de cualquier modelo depende en mayor medida del grado de precisión que se requiera, de la confiabilidad de los datos de entrada, de la experiencia individual para analizar los datos, y del grado de similitud que exista entre el sitio objeto de estudio y otros sitios que ya hayan sido exitosamente modelados.

Todos los modelos que se usan para determinar la tasa de producción estimada del GRS del sitio deben ser objeto de un completo análisis de sensibilidad con miras a determinar un rango aceptable de resultados y establecer cuáles parámetros ejercen mayor influencia en los cálculos de la producción del GRS. La identificación de parámetros sensibles puede requerir una recolección de datos confiable y adelantar posteriores refinamientos en las predicciones de la producción del gas. Dada la naturaleza heterogénea de las condiciones dentro del relleno y las típicas limitaciones respecto de los datos de entrada que normalmente se encuentran en un sitio candidato, es recomendable establecer un rango de valores aproximado y adelantar un análisis de sensibilidad que refleje las condiciones esperadas de generación del GRS. Usando los límites más altos y más bajos en la generación del GRS contra el perfil de tiempo basado en las condiciones probables dentro del relleno, es posible asignar valores y escoger datos de entrada que sean representativos como para considerarlos en una primera evaluación del potencial de un sitio, así como para establecer oportunamente qué factores de riesgo pueden surgir.

Los modelos cinéticos de primer orden son frecuentemente usados para estimar la producción de metano a lo largo de la vida útil de un relleno. Estos modelos son adaptados a rellenos específicos mediante hipótesis que se basan en las condiciones particulares del sitio. El modelo de degradación empírica de primer orden más ampliamente aceptado y utilizado por la industria y agencias reguladoras, incluyendo la U.S. EPA<sup>10</sup> es el Modelo Scholl Canyon. Este modelo se basa en la hipótesis de que el relleno tiene una fracción constante de material biodegradable en el relleno por unidad de tiempo.

El modelo se basa en la siguiente ecuación de primer orden:

$$Q_{CH_4i} = k * L_o * m_i * e^{-ki} \quad \dots(1)$$

$Q_{CH_4i}$  = metano producido en el año  $i$  desde la sección  $i^{th}$  del residuo

$k$  = constante de generación de metano

<sup>10</sup> United States Environmental Protection Agency (USEPA)



$L_0$  = potencial de generación de metano

$m_i$  = masa de residuo dispuesto en el año  $i$

$t_i$  = años después del cierre

Es una práctica típica asumir que el GRS generado está compuesto de cincuenta por ciento de metano y cincuenta por ciento de dióxido de carbono para que el total de GRS producido sea igual a dos veces la cantidad de metano calculado a partir de la ecuación (1).

La ecuación (1) es la base del Modelo de Emisiones de GRS de la U.S. EPA<sup>11</sup>. El Modelo Scholl Canyon predice el potencial de generación de metano ( $L_0$ ), los datos históricos de llenado del residuo y las proyecciones futuras del residuo que será dispuesto en el sitio. La U.S. EPA asigna valores de ajuste a cada uno de estos parámetros y de esta forma obtener una evaluación preliminar conservativa del sitio. Sin embargo, estos parámetros de entrada deben ser seleccionados con conocimiento de las condiciones específicas del sitio y sus alrededores.

La figura 4.3 muestra la curva de generación del GRS usando el Modelo Scholl-Canyon con los valores pre-establecidos de la U.S. EPA ( $k=0.05$ ,  $L_0=170$  m<sup>3</sup> de metano por tonelada de residuo) para un relleno con una tasa constante de llenado de 500,000 toneladas por año, durante un periodo de 25 años (desde 1990 hasta el 2015). La gráfica muestra dos curvas, la cantidad total teórica del GRS producido y el GRS recolectado asumiendo una eficiencia en el sistema de recolección del 75 por ciento. Aunque podría considerarse relativamente alta, una evaluación de la generación del GRS asumiendo que el 75 por ciento del combustible puede recolectarse, es bastante razonable. Por supuesto, un porcentaje de recuperación del 50 por ciento del combustible se considera también muy conservativo y fácilmente alcanzable, asumiendo que tanto la caracterización del residuo como el ejercicio de modelación están basados en datos y supuestos confiables.

La tasa constante de generación de metano ( $k$ ) representa la tasa de biodegradación de primer orden a la cual el metano es generado luego de la disposición del residuo en el sitio. Esta constante depende del contenido de humedad, la disponibilidad de nutrientes, el pH, y la temperatura. Como se mencionó anteriormente, el contenido de humedad dentro de un relleno es uno de los parámetros más importantes que inciden en la tasa de generación del gas. La humedad sirve además como medio para el transporte de nutrientes y bacterias. El contenido de humedad dentro de un relleno sanitario depende principalmente de la infiltración de aguas lluvias a través de la cobertura del relleno. Otros factores que afectan el contenido de humedad en el residuo y la tasa de generación incluyen el contenido inicial de humedad del residuo; la cantidad y tipo de cobertura diaria que se usa en el sitio; la permeabilidad y tiempo de disposición de la cobertura final; el tipo de impermeabilización de la base; el sistema de recolección de lixiviados; y la profundidad del residuo. Los valores típicos de  $k$  oscilan entre 0.02 para sitios secos y 0.07 para sitios húmedos. El valor predeterminado utilizado por la U.S. EPA para sitios con precipitaciones de más de 25 pulgadas (625 mm) por año es 0.05<sup>12</sup>. Se

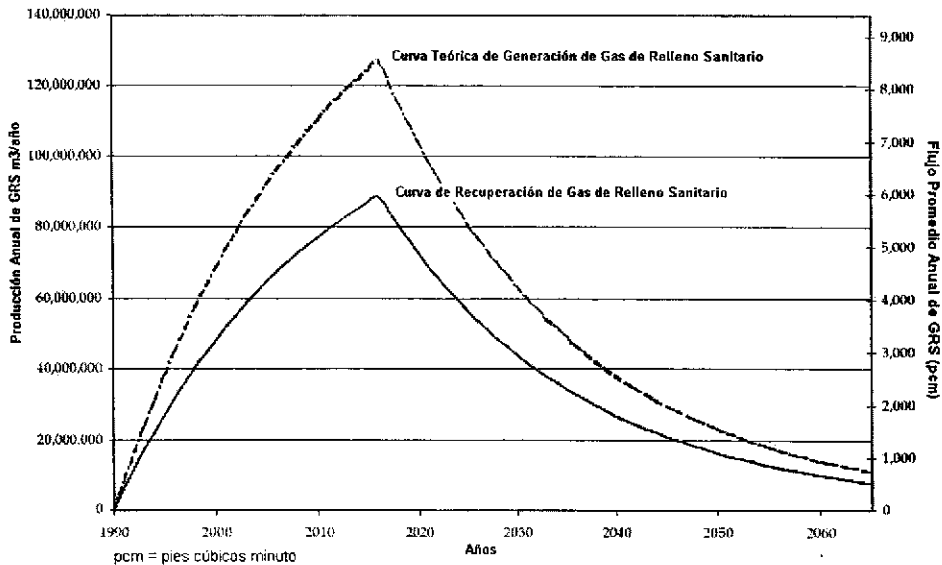
<sup>11</sup> El cual está disponible en su web site (<http://epa.gov/ttn/atw/landfill/landfillpg.html>)

<sup>12</sup> U.S. EPA, 1994

considera que este valor produce una estimación razonable de la generación de metano en ciertas regiones geográficas y bajo ciertas condiciones en el sitio. La tabla 4.1 presenta los rangos sugeridos y la asignación de los parámetros recomendados de la constante k.

El potencial de generación de metano ( $L_0$ ) representa la reserva total de metano en  $m^3$  de metano por tonelada de residuo. El valor  $L_0$  depende de la composición del residuo, y en particular, de la fracción de materia orgánica presente. Este valor se ha estimado con base en el contenido de carbono del residuo, la fracción de carbono biodegradable, y el factor de conversión estequiométrico<sup>13</sup>. Los valores típicos de este parámetro están el rango entre  $125 m^3$  y  $310 m^3$  de metano/tonelada de residuo. El aumento en la compactación del residuo no tiene efecto directo sobre el parámetro  $L_0$ . Sin embargo, la compactación y la densidad del residuo tienen una relación directa con la masa de residuo dentro de un volumen determinado, y por lo tanto con la cantidad potencial de GRS que puede ser producido a través del tiempo, así como con las características de desempeño de los sistemas que sea necesario instalar para su recolección. El usuario del modelo puede aumentar o disminuir el valor  $L_0$  en función del conocimiento específico que se tenga del residuo, en términos de la proporción orgánica.

Figura 4.3 Ejemplo de Curvas de Generación de Gas de Relleno Sanitario.



<sup>13</sup> En química estequiometría es el estudio y cálculos cuantitativos (medibles) de las relaciones de los reactivos y productos en reacciones químicas ( ecuaciones químicas) <http://en.wikipedia.org/wiki/Stoichiometry>

Tabla 4.1 Rango de Valores de  $k$  Sugeridos según la Precipitación Anual.

Precipitación Anual	Rango de Valores $k$ (Según condición del residuo).		
	Relativamente Inerte	Moderadamente Degradable	Altamente Degradable
<250 mm	0.01	0.02	0.03
>250 a <500 mm	0.01	0.03	0.05
>500 a <1000 mm	0.02	0.05	0.08
>1000 mm	0.02	0.06	0.09

La cantidad (en toneladas) de un residuo típico dispuesto en un relleno en un año determinado está representada por "m" en la ecuación del Modelo Scholl Canyon. En rellenos donde hay información suficiente y confiable que indique por ejemplo que hay una significativa porción de residuos inertes, tales como residuos de construcción y demolición, este parámetro puede ser reducido a un valor que refleje únicamente la cantidad de residuo que no es inerte. Sin embargo, en muchos casos no siempre hay suficiente información como para determinar qué porcentaje del residuo es inerte.

Solamente se recomienda reducir el parámetro  $L_0$  o la cantidad de residuo de entrada si existe precisa y suficiente información que permita cuantificar y discriminar el flujo de residuos inertes o relativamente inertes. Como se señaló antes, el parámetro  $L_0$  ya ha sido reducido sustancialmente respecto del valor teórico, precisamente para reflejar un residuo orgánico puro, lo que quiere decir que el parámetro reconoce el hecho de que hay presencia de materiales inorgánicos y humedad que cubren cierta porción de la carga de residuos. Cuando se cuenta con suficiente y confiable información respecto de los tipos y cantidades de residuos, es posible refinar la modelación usando como guía para la asignación de parámetros del factor  $L_0$ , la información que se muestra a continuación en la tabla 4.2. En este caso, el resultado de la evaluación completa de la generación de GRS sería de la suma de las curvas generadas para los varios tipos de residuo considerados.

Tabla 4.2 Valores de  $L_0$  Sugeridos según el Contenido Orgánico del Residuo.

Categorización del Residuo	Valor Mínimo $L_0$	Valor Máximo $L_0$
Residuo Relativamente Inerte	5	25
Residuo Moderadamente	140	200
Residuo Altamente Degradable	225	300

### Composición del GRS.

La calidad del GRS depende del sistema microbiano, del sustrato (residuo) que es degradado, y de variables específicas del sitio tales como acceso de oxígeno al residuo y contenido de humedad. El GRS está típicamente compuesto por aproximadamente 50 por ciento de metano y 50 por ciento de dióxido de carbono con menos de 1 por ciento de otras trazas de constituyentes del gas, incluyendo sulfuro de hidrógeno ( $H_2S$ ) y mercaptanos.

Hay cuatro fases de producción de gases que ocurren a lo largo de la vida de un relleno sanitario. Farquhar y Rovers predijeron por primera vez la generación de gas en un relleno de residuos sólidos municipales típico (Relleno Sanitario Manual) en los años 1970s. Una gráfica de las fases que ocurren en la generación de GRS se muestra en la Figura 4.4. La duración de cada una de estas fases depende de varios factores incluyendo el tipo de residuo, el contenido de humedad, el contenido de nutrientes, el contenido bacteriano, y el nivel de pH. Algunas guías generales respecto al tiempo de descomposición para varias categorías de residuos se muestran en la tabla 4.3.

Se debe tener presente que esta tabla solamente puede ser tomada como una guía general. La heterogeneidad del residuo, junto con el entorno de un relleno específico, tiene tanta influencia en el comportamiento mismo del residuo en el relleno y en la producción del gas, que la duración de cada fase no puede ser simplemente establecida como un rango general.

Figura 4.4 Fases que ocurren durante la generación de GRS.

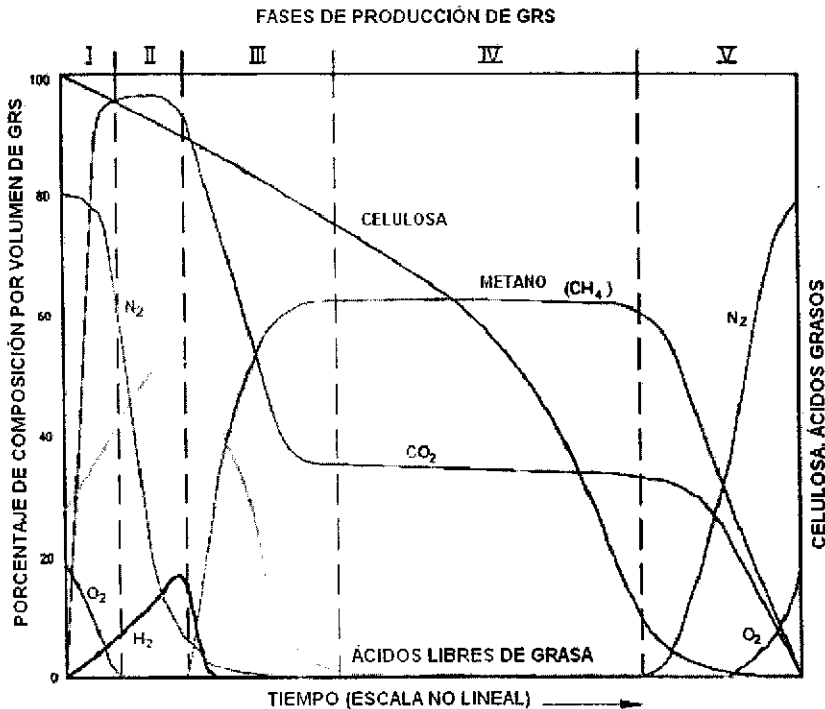


Tabla 4.3 Tiempo de descomposición de los residuos por fase.

FASE	CONDICIÓN	TIEMPO TÍPICO
I	Aeróbico	horas a 1 semana
II	Anóxico	De 1 a 6 meses
III	Anaeróbico, metagénico, no constante	De 3 a 6 meses
IV	Anaeróbico, metagénico, constante	De 8 a 40 años
V	Anaeróbico, metagénico, declinación	De 1 a más de 40 años
Total		10 a más de 80 años

La primera fase de descomposición aeróbica, ocurre inmediatamente después que el residuo es dispuesto, y ocurre con presencia de oxígeno dentro del residuo. La descomposición aeróbica produce dióxido de carbono, agua, y calor. La siguiente etapa es la anóxica, la fase no metanogénica, en la cual se forman compuestos ácidos y gas de hidrógeno con continua producción de dióxido de carbono. La tercera fase es la fase metanogénica no constante, durante la cual la producción de dióxido de carbono comienza a declinar debido a que la descomposición del residuo pasa a ser anaeróbica. La descomposición anaeróbica produce calor y agua, pero a diferencia de la descomposición aeróbica, ésta produce metano. Durante la cuarta fase se genera un volumen de metano entre el 40 y el 70 por ciento del volumen total. Típicamente, el residuo en la mayoría de los rellenos puede alcanzar la fase metanogénica estable dentro de un lapso de menos de 2 años después que el residuo es dispuesto. Dependiendo de la profundidad de las capas en que se dispone el residuo, y del contenido de humedad del mismo, la fase metanogénica podría alcanzarse incluso a los seis meses después de la disposición. El GRS puede producirse en un sitio hasta por un período de 100 años a partir de la fecha de disposición, con emisiones en continua declinación de sus niveles, tal como se observa en la figura 4.4.

### Impacto potencial del GRS.

El componente más importante del GRS desde todas las perspectivas es el metano, el cual constituye aproximadamente el 50 por ciento del GRS producido. El metano representa un potencial riesgo dado que es combustible y explosivo a concentraciones entre 5 y 15 por ciento en aire. Los GRS pueden también migrar por debajo de la superficie en zonas de suelos no saturados, especialmente durante los meses de invierno y primavera en los que la superficie está congelada o saturada de humedad en la superficie. Los GRS pueden acumularse también en estructuras confinadas con los potenciales riesgos que ello implica. El metano es inoloro y por lo tanto, es imposible de detectar si no se cuenta con los instrumentos apropiados.

### Beneficios potenciales de los GRS.

Los proyectos de manejo del GRS mediante la recolección y combustión del mismo tienen el potencial de generar ingresos a través de la venta de RCE's, lo cual a su vez se constituye en una oportunidad para mejorar el diseño y operación de los rellenos y para implementar un mejor sistema integral de administración de los residuos municipales.

Este recurso puede aprovecharse en varias aplicaciones incluyendo uso directo como combustible para calefacción, generación eléctrica, y subproductos químicos comerciales. Adicionalmente a la mitigación de los problemas de olores y migración del GRS, su utilización genera también ingresos por la venta de "energía verde" y otros productos que incluso pueden sufragar los costos de operación y mantenimiento de los rellenos, e incentivar mejoras en el diseño y operación.

#### 4.2.1 Clasificación de GRS.

El GRS puede clasificarse en las siguientes tres categorías, dependiendo del nivel de pretratamiento y procesamiento que requiera antes de su utilización:

- Combustible grado bajo. La utilización del GRS como un combustible de bajo grado típicamente requiere un procesamiento mínimo e involucra básicamente una cámara de remoción de condensados como parte del sistema de recolección y estanques de eliminación de humedad para reducir su nivel en el flujo de gas. Tiene un valor calorífico de aproximadamente 16.8 MJ/m<sup>3</sup>.
- Combustible grado medio. Equipos adicionales de tratamiento del gas se usan para extraer más humedad (con contaminantes) y material particulado más fino. El proceso típico involucra compresión y refrigeración del gas y/o tratamiento químico, o torres lavadoras para remover la humedad adicional y trazas de compuestos del gas tales como mercaptanos, compuestos de azufre, siloxanos, y compuestos orgánicos volátiles (COV). Tiene un valor calorífico de aproximadamente 16.8 MJ/m<sup>3</sup>.
- Combustible grado alto. La utilización del GRS como combustible de alta gradación involucra un complejo pretratamiento para separar el dióxido de carbono y otros constituyentes mayores del gas metano, y remover impurezas como mercaptanos, compuestos de azufre, sulfuro de hidrógeno y COV; y compresión del gas para deshidratarlo. Tiene un valor calorífico de 37.3 MJ/m<sup>3</sup>.

#### Aplicaciones del combustible de grado bajo.

- ❖ Calefacción. Con un tratamiento mínimo, el GRS puede usarse como combustible en un horno, un secador, o una caldera ubicada dentro o fuera del sitio.
- ❖ Caldera/Turbina de Vapor. El GRS de grado bajo puede usarse también como combustible de calderas que produzcan vapor para calefacción o generación de electricidad. Este tipo de uso requiere sólo un tratamiento mínimo porque el GRS no es potencialmente dañino para las partes móviles del equipo, ya que estas partes no entran en contacto con el gas.
- ❖ Microturbinas. Las microturbinas pueden usar GRS de grado bajo con una capacidad de calentamiento tan baja como 350 Btu/scfm. Estas turbinas pueden normalmente proporcionar hasta 75 kW de energía eléctrica y 85 kW de calor en aplicaciones combinadas de energía y calentamiento.

### Aplicaciones del combustible de grado medio.

- ❖ **Calefacción.** El combustible de grado medio tiene un rango de aplicaciones más amplio que el de grado bajo dada la reducción en sus constituyentes corrosivos. Este combustible puede usarse en calderas industriales, hornos secadores, u hornos a gas.
- ❖ **Motores de Combustión Interna a Gas.** Los motores de combustión interna que usan GRS de grado medio como combustible se pueden adquirir fácilmente como unidades modulares o dentro de un paquete integrado con el generador. Estos motores se consiguen en varios tamaños con salidas de energía que oscilan entre 0.5 MW y más de 3.0 MW por unidad, tienen un costo de capital por KW comparativamente bajo, y dan una mayor eficiencia que la mayoría de turbinas de gas. Además, la naturaleza modular de estos motores permite flexibilidad para las expansiones progresivas que pueden ser necesarias debido a las incertidumbres asociadas a la futura producción de GRS. Estas unidades pueden adicionarse en etapas incrementales más pequeñas que las de turbinas de gas, pero tienen como desventaja el hecho de que los costos de mantenimiento son más altos, y requieren personal de mantenimiento más calificado. Adicionalmente, los gases de combustión pueden contener ciertos productos de combustión incompleta, y por lo tanto requerir una provisión extra para la disposición del aceite residual dado el alto consumo de aceite lubricante de sus unidades.
- ❖ **Turbinas de Gas.** Las turbinas de gas se encuentran disponibles como sistemas integrados y modulares, y pueden tener alguna aplicación en sitios con tasas de producción de GRS más altas y estables. Estas unidades son por lo general más grandes que los motores de combustión interna y tienen una salida de energía eléctrica que oscila entre 1MW y 8MW por unidad. Las turbinas de gas ofrecen también la facilidad de expansión modular para acomodarse a los cambios en la producción de GRS, aunque las etapas incrementales son más grandes que en los motores de combustión interna. Las turbinas de gas usualmente tienen un costo de capital más elevado asociado a la puesta en marcha inicial y, en cierta forma, a las eficiencias de conversión de energía más bajas, en comparación con los motores de combustión interna. No obstante, estas unidades generalmente ofrecen unas mejores características de las emisiones de escape, menores costos de operación y mantenimiento y mayor flexibilidad operacional (referida a la capacidad de mantener una eficiencia razonable a pesar de las fluctuaciones que se presenten en el flujo y características del GRS) que los motores de combustión interna.
- ❖ **Sistemas de Ciclo Combinado.** Los sistemas de ciclo combinado utilizan turbinas de gas y turbinas de vapor para producir electricidad. El proceso genera un mejoramiento significativo en la eficiencia de conversión eléctrica de más de 40 por ciento. Las plantas de ciclo combinado por lo general son rentables sólo para plantas con salidas de más de 10 MW.

### Aplicaciones del combustible de grado alto.

- ❖ **Gas Calidad Gasoducto.** En este tipo de uso el componente metano del GRS refinado es generalmente como sustituto directo del gas natural. El gas calidad gasoducto se entrega a presión bien sea a una planta local o directamente al usuario. Los mercados que se buscan para este tipo de producto son plantas de

gas natural o usuarios industriales cercanos. La producción de gas calidad gasoducto involucra la remoción del dióxido de carbono y otros gases presentes en el GRS, lo cual produce un gas que es aproximadamente 98 por ciento metano en volumen.

- ❖ **Venta Comercial de Dióxido de Carbono.** La producción de dióxido de carbono como resultado de la separación del GRS en sus principales constituyentes es considerada como un subproducto de la producción de combustible de alto Btu. El dióxido de carbono se remueve del GRS mediante absorción superficial (tamiz molecular), separación de membrana, o mediante un sistema de tratamiento con solventes (methyl diethanolamine, methyl ethanolamine-diethanolamine absorción, diglycolamine, carbonato de potasio caliente, carbonato de propileno y selexol). Todos estos sistemas utilizan solventes líquidos que tienen afinidades individuales por el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno, y en ciertos casos, con el agua, pero que muestran mínima afinidad con el metano. Este proceso permite también separar el metano de los otros gases para producir gas calidad gasoducto. Aunque es técnicamente viable, a la fecha no se tiene conocimiento que existan o estén siendo planeadas instalaciones para venta de dióxido de carbono derivado del GRS. El mayor uso del dióxido de carbono se presenta en las industrias de bebidas y procesamiento de alimentos.
- ❖ **Producción de Productos Químicos.** El metano y el dióxido de carbono, los principales componentes del GRS, pueden usarse como materia prima de ciertos productos químicos tales como metanol, fertilizantes y en celdas de combustible. De hecho, ya hay disponibles procesos registrados para producir metanol a partir del GRS. El metanol puede usarse como un combustible alternativo o aditivo de combustible en motores a gasolina y diesel, así como agente blanqueador alternativo en la industria de pulpa y papel. Sin embargo, los elevados costos de capital, los mercados aún limitados de estos productos y la complejidad de los procesos involucrados, hacen de este uso una opción poco favorable.
- ❖ **Celdas de Combustible.** Las celdas de combustible son una nueva tecnología mediante la cual se transforma directamente el hidrógeno en energía. Las celdas de combustible requieren el uso de un procesador de combustible de alto grado, que incluye un transformador de potencia y una torre de enfriamiento para el tratamiento en caliente del residuo. Normalmente, una planta de generación de potencia basada en una celda de combustible se construye usando varias celdas individuales de combustible, lo cual permite configurar un sistema incremental que permite las expansiones necesarias para satisfacer las reservas de combustible.
- ❖ **Combustible para Vehículos.** El GRS comprimido (CNG por sus siglas en inglés) y licuado (LNG), ya producido mediante procesos registrados, se usó por primera vez como combustible de vehículos como parte de un proyecto de demostración en el relleno sanitario Puente Hills en California. Para este tipo de uso, primero, el gas tiene que ser tratado para remover impurezas y elevar su valor como combustible antes de ser comprimido. Como ventajas de esta aplicación se pueden mencionar la reducción del consumo de combustibles fósiles y de la polución local debida al ozono. Sin embargo, esta aplicación implica unos costos significativos asociados a la modificación que requieren los vehículos para operar con este tipo de combustible y al costo de construcción de las estaciones de servicio.



## Procesamiento del GRS.

La primera forma de tratamiento del GRS es la remoción de ciertas cantidades del vapor de agua contenido en el gas. Al reducir el contenido de humedad del gas y las trazas de componentes y partículas, se reduce su naturaleza corrosiva, con lo cual se disminuyen también los costos de mantenimiento del equipo de utilización. La producción del combustible de alta gradación requiere también la separación de la porción de metano presente en el GRS de los otros gases que no tienen valor calorífico. Al igual que con las aplicaciones de combustible de alta gradación, las tecnologías que se describen a continuación están ya registradas, así que se necesitan cálculos específicos dentro de la evaluación del proyecto para evaluar su aplicación y viabilidad en cada sitio en particular.

- ❖ **Remoción de Humedad.** La degradación del residuo orgánico es un proceso exotérmico y por lo tanto el GRS es caliente y esencialmente saturado con vapor de agua. El alto contenido de humedad, en combinación con el dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y COV, produce un gas que es potencialmente corrosivo. Entre las tecnologías disponibles para reducir la humedad se pueden citar, separadores de humedad, eliminadores de brumas, enfriamiento directo, compresión seguida de enfriamiento, absorción y adsorción.

Algunos separadores de humedad funcionan mediante centrifugación del gas a través de un cilindro grande, en el que la disminución de la velocidad del gas permite que la humedad en forma de gotas sea recolectada en las paredes del cilindro. Los eliminadores de neblina, o filtros fundentes, son generalmente utilizados junto con un separador de humedad para capturar las gotas muy pequeñas que son interceptadas en el separador. Estos son por lo general construidos de un panel de malla de alambres a través del cual pasa el GRS. Estos eliminadores también interceptan el material particulado incrustado dentro de las gotas de agua.

Dado que el enfriamiento y compresión del gas disminuye la capacidad del GRS de retener agua, este proceso se alcanza usualmente mediante el uso de intercambiadores de calor aire/aire o aire/líquido. La compresión que sigue al enfriamiento sirve a su vez para deshidratar el aire, aunque esto conlleva un incremento de la temperatura del gas, aspecto que debe considerarse en la evaluación de su utilización final.

La absorción utiliza un líquido que tiene una alta afinidad por el agua. En este proceso, el GRS que va a ser absorbido puede ser introducido en el fondo de una columna de medio absorbente, o el medio se rocía dentro de la corriente de gas. El agua es removida del gas como resultado de un proceso de reacciones físicas y químicas con el medio absorbente. La eficacia de este proceso depende del medio absorbente específico que se use y de las características del GRS.

Las tecnologías de adsorción utilizan un material sólido granular que tiene afinidad por el agua. En este proceso el agua se "adhiera" al material granular en la medida que el gas pasa. Entre los tipos de medio se incluyen la sílica gel, alúmina, y silicatos conocidos como filtros moleculares. Esta tecnología algunas veces se utiliza junto con la absorción en combinación con sistemas tales como torres modulares, columnas de bandejas, torres rociadoras, y torres lavadoras tipo vénturi.

- ❖ **Remoción de Partículas.** Las partículas sólidas transportadas dentro de la corriente del GRS deben removerse en aplicaciones para uso como combustible de grado medio a alto, con el fin de evitar daños en los sistemas de soplado y en otros componentes. Dado que la mayor parte del material particulado fino está incrustado en las gotas de humedad del gas, la remoción de humedad cumple con el propósito adicional de remover también el material particulado. No obstante, existen filtros de partículas que pueden usarse específicamente para reducir el contenido de partículas del gas pero estos requieren un alto nivel de mantenimiento y deben limpiarse o reemplazarse frecuentemente.
- ❖ **Remoción de Trazas de Gas.** Las trazas de gases que normalmente se remueven de los GRS constituyen compuestos de sulfuros, compuestos orgánicos no metanos y COV. Estos compuestos se pueden remover mediante el uso de carbón activado granular (CAG), solventes selectivos, o esponjas de hierro. El carbón activado es el método más comúnmente utilizado como tratamiento de hidrocarburos y COV, pero tiene la desventaja de ser altamente afin con la humedad. No obstante, esto puede mitigarse mediante la implementación de un buen proceso de remoción de humedad previo al uso de CAG. Como su nombre lo indica, en los procesos con solventes selectivos se utilizan varios solventes que selectivamente adsorben las trazas de gases. Los procesos mediante esponjas de hierro, en los cuales se utiliza óxido de hierro hidratado soportado sobre retazos de madera que reacciona y produce sulfuro de hierro, pueden usarse para remover sulfuro de hidrógeno del GRS.
- ❖ **Remoción de Dióxido de Carbono.** El dióxido de carbono no tiene valor calorífico y produce un líquido corrosivo cuando se combina con vapor de agua. Este compuesto puede removerse mediante el uso de métodos de extracción, adsorción, y separación de membrana, lo cual permite incrementar el valor calorífico del GRS y ser recolectado para uso en el procesamiento de otros productos finales. Existen también otras tecnologías registradas para remover el dióxido de carbono usando solventes, bajas temperaturas y alta presión. Así mismo, ciertos procesos usan también múltiples etapas de filtrado moleculares para absorber el dióxido de carbono. Adicionalmente, existen membranas que son permeables solamente a la fracción de dióxido de carbono del GRS y por lo tanto pueden usarse para separar las fracciones mayores de este compuesto.

#### 4.3 Descripción de componentes de plantas de electricidad con base a biogás.

##### Sistema de Recolección del GRS.

Un sistema típico de recolección de GRS para la generación de electricidad está constituido de los siguientes componentes:

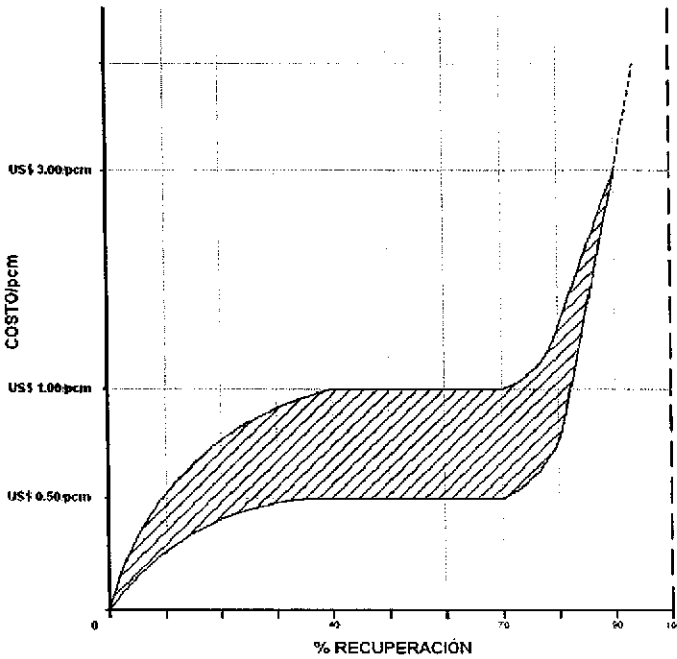
- ✓ Campo de recolección del GRS (pozos y canales);
- ✓ Tubería de recolección (laterales, secundarias, principales, etc.);
- ✓ Sistema de retiro y disposición de condensados;
- ✓ Sistema de soplado y accesorios relacionados; y
- ✓ Combustión del GRS.

**Campo de recolección de GRS.**

Este campo consta de una red vertical de pozos de extracción y/o de zanjas o canales de recolección del GRS, los cuales se instalan dentro de la masa de residuos. El principio básico de operación es bastante simple, pues sólo requiere aplicar una succión para extraer los gases de la masa de residuo hasta un nivel cercano a la tasa a la cual el gas va a ser generado dentro del área de influencia del pozo o canal. El objetivo ideal es establecer un gradiente neutro de presión/succión continuamente sobre toda la superficie del relleno. Puesto que la condición ideal no puede lograrse a costos razonables, es importante hacer un balance del costo-beneficio entre la opción de instalar pozos adicionales en una red con mayor número de pozos junto con un sistema de tapones complementario y el valor inherente a la recuperación del combustible como recurso.

El costo de incrementar la extracción del GRS hasta aproximadamente 75 por ciento del gas que es generado es prácticamente lineal. Sin embargo, para lograr altas eficiencias de recuperación se puede utilizar una red de pozos/canales de extracción más numerosa y/o un sistema de cobertura sintético, aunque esta opción implica un mayor incremento en el costo de capital con relación a la ganancia que se obtiene en la recuperación del gas. La figura 4.5 ilustra la relación entre la eficiencia de un sistema de recolección del GRS y su costo.

*Figura 4.5 Relación entre la eficiencia de un sistema de recolección del GRS y su costo.*



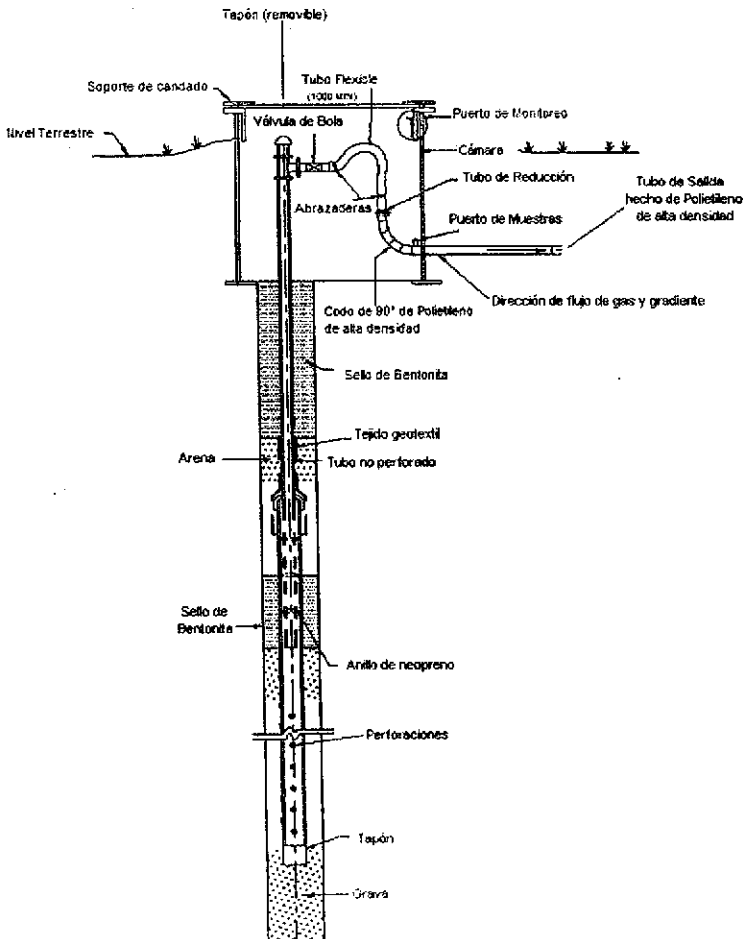
**COSTO CONTRA EFICIENCIA DE RECUPERACION**

Los pozos verticales son típicamente instalados en el relleno una vez se han finalizado las operaciones. La figura 4.6 muestra el esquema típico de un pozo de extracción del GRS.

La utilización de pozos verticales en la extracción del GRS ofrece las siguientes ventajas:

- Mejora el control de las emisiones de gases;
- El campo de pozos puede ser ampliado en cualquier momento en función de la variabilidad de las condiciones en el relleno; y,
- Se minimiza la recolección de condensados.

Figura 4.6 Esquema típico de un pozo de extracción del GRS.



Para maximizar la eficiencia de la recolección, los pozos deben ubicarse teniendo en cuenta la profundidad del residuo, su edad y la configuración geométrica del sitio. Cuando existe incertidumbre respecto a la migración subterránea del GRS, los pozos ubicados cerca de los límites exteriores del residuo deben agruparse más de tal forma que actúen como un sistema de control de migración.

A continuación se presentan algunas de las reglas generales para la instalación de pozos verticales de extracción:

- ❖ Mantener un mínimo de 3 a 6 m de espesor de masa de residuos sobre las perforaciones del pozo para minimizar la entrada de aire al sistema de recolección;
- ❖ La profundidad desde la superficie a las perforaciones debe incrementarse en los pozos ubicados cerca de las pendientes laterales; y
- ❖ La instalación de pozos a lo largo de las pendientes laterales más inclinadas (4:1) es limitada cuando se usa equipo de perforación convencional.

Las condiciones pueden no ser totalmente idénticas en cada relleno, sin embargo las anteriores reglas son una buena guía para asegurar un correcto funcionamiento el sistema de recolección y para minimizar la entrada de aire hacia el sistema de antorcha o la planta de generación de GRS.

Los canales horizontales de recolección del GRS son normalmente utilizados cuando el sitio aún está activo. A continuación de la colocación y compactación de una capa de residuo, se instalan tuberías de recolección perforadas que luego son cubiertas con otra capa de residuo. Esto permite que el gas sea recolectado desde el residuo ubicado directamente debajo de la zona donde se está llevando a cabo la disposición. Debido a que esta técnica puede controlar las emisiones del GRS sólo en áreas activas del sitio, los canales horizontales de recolección no son generalmente muy confiables para el control localizado de gases.

Las figuras 4.7 y 4.8 muestran el esquema típico de un canal o zanja horizontal de recolección del GRS.

Figura 4.7 Esquema típico de un canal o zanja horizontal de recolección del GRS.

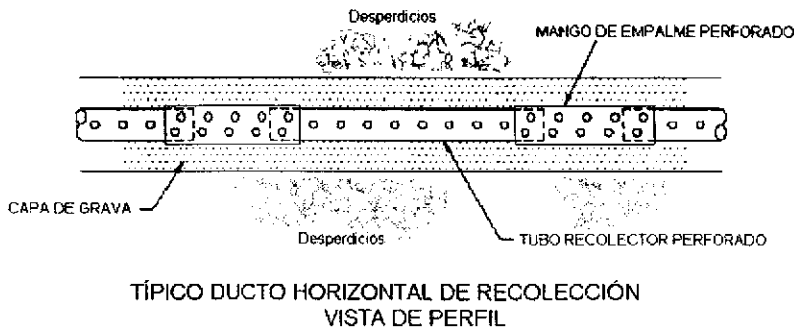
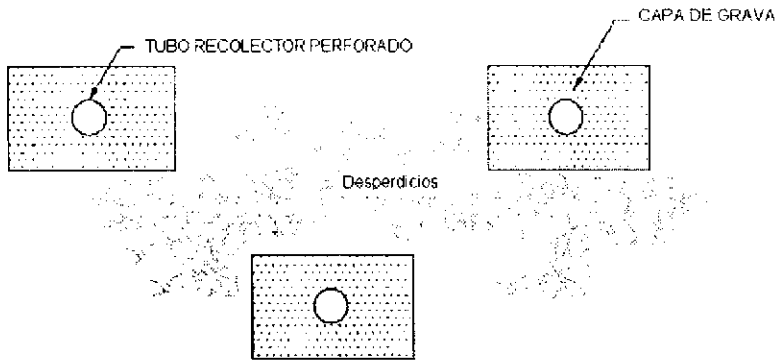
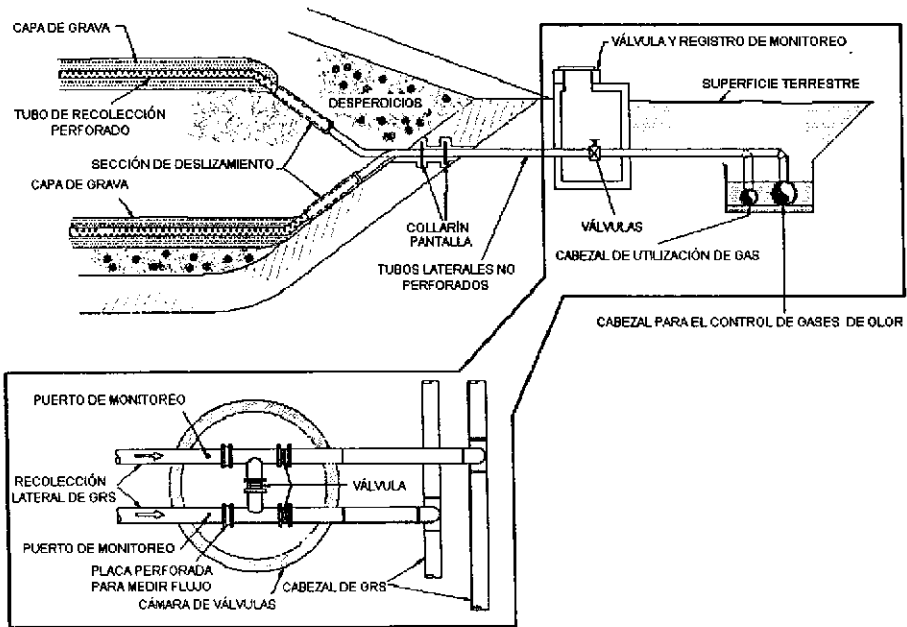


Figura 4.7 (continuación) Esquema típico de un canal o zanja horizontal de recolección del GRS.



TÍPICO DUCTO HORIZONTAL DE RECOLECCIÓN  
SECCIÓN TRANSVERSAL

Figura 4.8 Esquema típico de un canal o zanja horizontal de recolección del GRS.



En general, los principios de operación de los pozos verticales y canales horizontales son los mismos. Ambos tipos de recolección deben ser equipados con secciones telescópicas de tubería no perforada para permitir un asentamiento normal del residuo, el cual ocurre tiempo después. Se ha encontrado que cuando se utiliza un equipo económico de extracción una succión entre 10 y 15 pulgadas de columna de agua en el cabezal del pozo o canal, es suficiente para maximizar zonas de influencia y minimizar la entrada de aire dentro del residuo. El radio de la zona de influencia con este vacío oscila entre 20m y 100m, dependiendo de la heterogeneidad y otras características asociadas del residuo.

El sistema de recolección del GRS debe ser utilizado conjuntamente con unas buenas prácticas de manejo de los lixiviados. Los lixiviados que se acumulan dentro del residuo pueden afectar considerablemente la tasa de recuperación del gas debido a que el líquido en los pozos y canales limita su capacidad de recolección y transporte. En sitios extremadamente húmedos, la recuperación efectiva del gas puede caer hasta niveles de menos del 50% con respecto a la cantidad de GRS que se estima hay disponible.

Los costos de instalación de pozos verticales pueden variar considerablemente en función de los costos locales de materiales (agregados, tuberías y mortero llenante); disponibilidad de contratistas; tipo y capacidad de equipo disponible; y características específicas del diseño del pozo. Los ciclos de reemplazo o reparación de los pozos pueden variar sustancialmente de acuerdo con el diseño y las condiciones específicas del sitio. En la tabla 4.4 se presentan algunos rangos típicos de costos de instalaciones de recolección del GRS:

Tabla 4.4 Rangos Generales de Costos de Pozos Verticales.

Descripción	Rango Bajo US\$/m vertical	Rango Alto US\$/m vertical	Comentarios
100 a 150mm de diámetro de pozos (<15m de profundidad)	\$150	\$250	
100 a 150mm de diámetro de pozos (>15m pero < 30m de profundidad)	\$200	\$350	
900mm de diámetro de pozos (cualquier profundidad)	>\$500		Estos pozos no se recomiendan puesto que no son rentables. Presentan un problema común de obstrucción a medida que avanza la perforación, lo cual, puede ocasionar un gran aumento en su costo.

#### Tubería de recolección del GRS.

Es necesario también instalar una red de tuberías que conecte el campo de recolección del GRS con la planta de Generación de GRS o la antorcha. Una configuración típica de la tubería de recolección del GRS incluye los siguientes elementos:

- ❖ Diámetro pequeño (mínimo 100 mm), laterales cortos que conecten los pozos/canales;
- ❖ Colectores secundarios que conectan los laterales; y

- ❖ Colectores principales que conectan los secundarios con la planta de extracción  $m^3$ .

Hay muchos modelos de redes de tuberías de GRS que han sido diseñados para facilitar el drenaje de líquidos y minimizar la longitud del sistema de recolección. Las configuraciones más conocidas son la tipo "espina de pescado" y la tipo "colector principal anular", que se muestran en las figuras 4.9 y 4.10 respectivamente. El arreglo en espina de pescado incluye básicamente un gran colector principal y colectores secundarios y principales que se ramifican del mismo. Este es el arreglo más eficiente para la tubería, ya que permite minimizar la cantidad de condensados que se acumulan en el sistema de recolección, mediante la inclinación de la mayoría de las tuberías en dirección a los pozos.

Figura 4.9 Configuración tipo "espina de pescado" de una tubería de recolección de GRS.

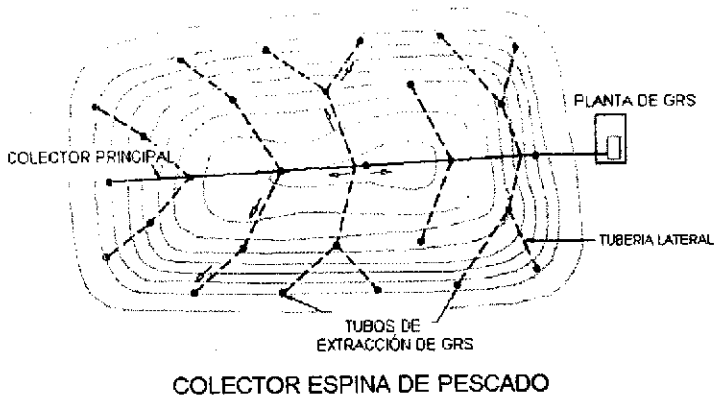
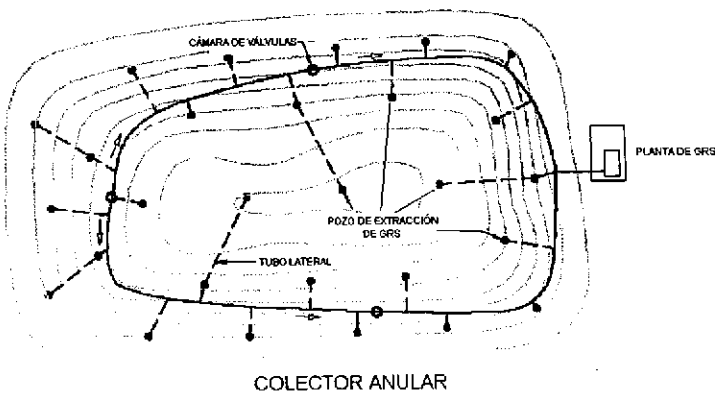


Figura 4.10 Configuración tipo "colector anular" de una tubería de recolección de GRS.





La instalación de un colector principal anular dentro del sitio es recomendable cuando fuera del sitio no hay terreno disponible para la construcción de un sistema de colector principal convencional. Colectores principales anulares fuera del sitio reducen los problemas que se derivan del proceso de instalación de la tubería dentro del residuo. Este sistema de colectores puede equiparse con válvulas para permitir aislamiento de ciertos tramos en el sitio, y con puertos para el monitoreo de la calidad y cantidad del gas. Un doble sistema de colectores principales puede utilizarse en rellenos grandes y profundos, y que tengan una vida activa larga, con el fin de separar el metano rico de las porciones más profundas del relleno de las superficiales en las que el metano puede estar diluido debido a la entrada de aire. Hay varios criterios y restricciones de diseño relacionados con las instalaciones de tuberías tales como pendientes mínimas y máximas; remoción de la humedad de condensados; asentamiento diferencial y total; y presiones de carga viva y muerta.

Los costos relativos de los sistemas de tuberías para recolección y conducción del GRS hacia las instalaciones de aprovechamiento o combustión pueden variar sustancialmente dependiendo de las condiciones específicas del sitio y del diseño. Por ejemplo, los sistemas de tuberías superficiales son menos costosos y normalmente se utilizan como sistemas temporales o para reparaciones de corto plazo, aunque en algunos casos también se han utilizado exitosamente en sistemas de gran escala y de largo plazo. Hay ventajas y desventajas asociadas a la instalación de sistemas de tubería de conducción tanto para las alternativas superficiales como para las subterráneas. Los costos asociados a un diámetro pequeño de tuberías superficiales son del orden de \$30/metro, y de más de \$200/metro para diámetros mayores con tubería enterrada. En general, el costo está determinado por factores tales como:

- ❖ Las características del diseño (superficial o subterráneo);
- ❖ La necesidad de remover y reubicar residuos;
- ❖ La necesidad de agregar material para llenar o nivelar áreas de la corona y perimetrales;
- ❖ La extensión y número de trampas de remoción de condensados;
- ❖ El costo del petróleo y productos asociados; y
- ❖ La disponibilidad de contratistas para su construcción.

Las características específicas de un relleno tienen muchas implicaciones directas en las opciones de diseño y costos asociados a los sistemas de tuberías. Por lo tanto, es recomendable que estos costos se revisen cuidadosamente teniendo en cuenta las condiciones específicas de cada proyecto. Es importante anotar también que la tubería de polietileno de alta densidad (HDPE) es la más recomendable para uso en la mayoría de sistemas de conducción de GRS, además de que su precio puede ser controlado en función del costo del petróleo y la proximidad de los fabricantes y proveedores.

### **Sistemas de soplado y accesorios relacionados.**

El sistema de soplado incluye todos los componentes que se utilizan para generar y aplicar el vacío necesario para recolectar el GRS y suministrarlo para su subsiguiente uso final. Un sistema de soplado debe estar estratégicamente ubicado, con suficiente margen para expansión, y cerca del usuario final (red de energía eléctrica o tuberías de gas). Este sistema puede ubicarse dentro de un edificio o montarse en una plataforma como una instalación exterior.

Los componentes de un sistema de soplado son:

- ❖ Las válvulas y controles necesarios para una operación segura
- ❖ Bombeo o almacenaje de condensados;
- ❖ Medición y registro del flujo del GRS; y
- ❖ Sopladores o compresores que cumplan los requerimientos de capacidad.

El sistema de soplado debe tener la capacidad de manejar el 100 por ciento de la tasa máxima estimada de producción del GRS, más alguna asignación para control de migración. Por lo general es recomendable también dejar cierto margen de reserva en todos los sistemas de soplado que suministren combustible a un sistema de utilización de GRS, sobre todo cuando su existencia depende de los ingresos que genere. Dependiendo del tamaño y edad del relleno, en ciertas ocasiones puede ser conveniente construir la planta de utilización del GRS por etapas, especialmente cuando se anticipan incrementos graduales en la producción del GRS.

Los costos del sistema de soplado dependen de muchos factores y pueden determinarse únicamente con base en los requerimientos específicos de todo el sistema. Algunos de los principales factores que afectan la selección del soplador son:

- ❖ El rango propuesto del flujo de gas que va a ser recolectado;
- ❖ El diseño del sistema de tubería y el criterio que se asuma como pérdida de cabeza de presión;
- ❖ Presión de vacío disponible en el pozo;
- ❖ Longitud del sistema de tuberías de recolección; y
- ❖ Demanda de presión en el sistema de utilización o combustión.

El costo de un sistema de soplado para una aplicación de combustión del gas puede variar entre \$25,000 y \$50,000 por 1000 m<sup>3</sup>/hora de GRS. Si la aplicación final va a ser una instalación de utilización, el costo puede incrementarse en un factor entre 2 y 5, o mayor, dependiendo de los requerimientos de suministro del combustible.

#### **Sistema de retiro de los condensados.**

El GRS es extremadamente húmedo y por lo tanto produce muchos condensados dentro de la tubería y pozos de recolección. Es importante que toda la tubería se diseñe con unas pendientes mínimas para evitar que los condensados se estanquen, y por el contrario, fluyan continuamente hacia un drenaje o caja recolectora cercana. Un inapropiado drenaje de los condensados puede producir obstrucciones en la tubería, dejar fuera de servicio largos tramos del sistema de recolección y limitar la cantidad de gas que puede ser recolectada.

Para prevenir que las tuberías se inunden es recomendable construir como mínimo un pozo de separación de humedad para remover los condensados. Los separadores de humedad remueven gotas de líquido del flujo de gas y reducen el efecto de deterioro que el condensado corrosivo puede tener sobre el equipo de utilización del GRS.

### **Importancia del manejo de los condensados en el desempeño del sistema de recolección del GRS.**

Uno de los problemas operacionales más comunes de los sistemas de recolección del GRS es la obstrucción por líquidos en la tubería o pozos, lo cual tiene el potencial de paralizar la operación de todo el sistema. El bloqueo de los colectores principales o secundarios usualmente se debe al aumento de los condensados; lo cual implica que es necesario instalar adecuados sistemas de remoción. Asimismo, problemas de bloqueo causados por un inadecuado dimensionamiento de las tuberías o que son diseñadas con insuficiente pendiente, pueden llegar a impedir por completo la recolección del GRS en la sección del relleno afectada. Otra de las razones por las cuales los condensados pueden aumentar es el asentamiento diferencial del residuo, el cual puede producir una concavidad o punto bajo en la tubería facilitando la acumulación de condensados. Por esta razón los sistemas de recolección deben ser diseñados con un gran excedente de capacidad y prestando especial atención al manejo de los problemas de asentamiento.

Una vez que los condensados se separan del GRS, estos se deben disponer de una manera ambientalmente sana. En algunas regiones incluso, los condensados pueden ser considerados como residuos líquidos peligrosos debido a que son generalmente más concentrados que los lixiviados.

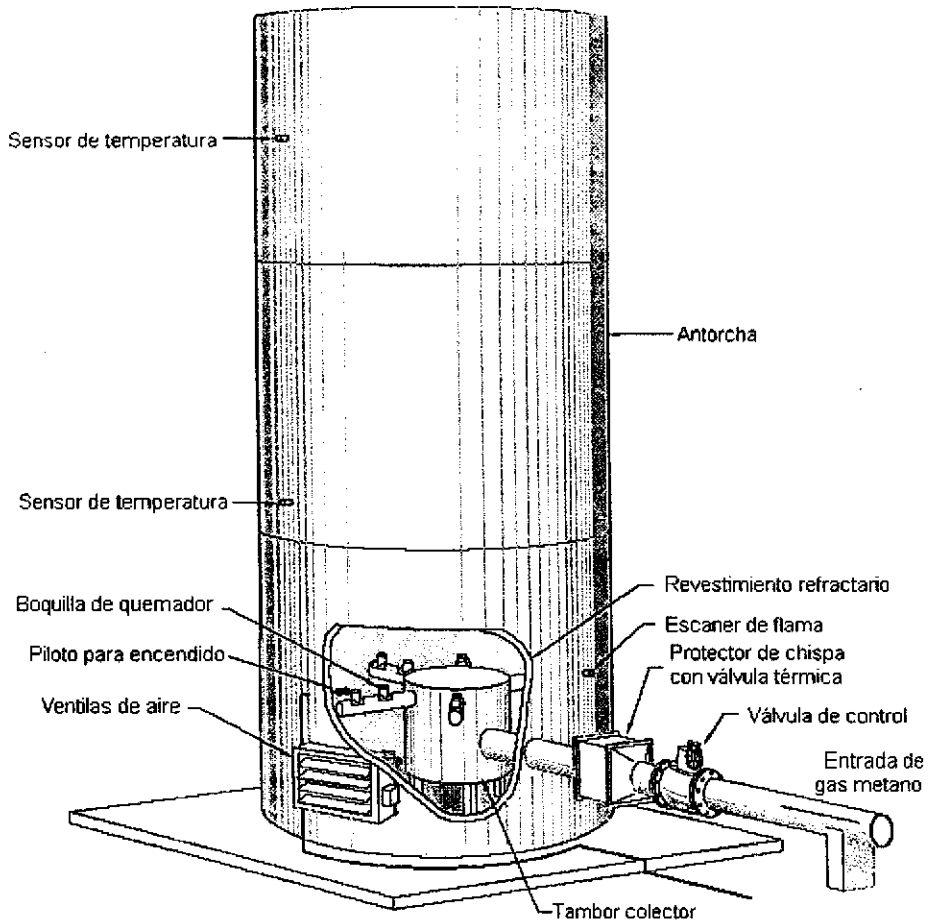
### **Combustión del GRS.**

El GRS recolectado en un sitio se considera que es dispuesto de una manera ambientalmente sana si se quema en una antorcha en cilindro cerrado o se aprovecha en un sistema de utilización. La combustión del GRS puede usarse como una opción de emergencia del sistema de utilización en casos en los que, debido a eventos de operación y mantenimiento de los equipos, sean estos programados o no, se presenten prolongados periodos de inactividad. La necesidad de una combustión de emergencia y de un excedente de disponibilidad de equipos es opcional dependiendo de la confiabilidad de los sistemas en conjunto, la sensibilidad a pérdidas de corto plazo en la extracción del GRS, y la capacidad de control que se disponga. La combustión del GRS a altas temperaturas convierte los componentes del metano en dióxido de carbono y agua. Esta alta temperatura de combustión asegura también que las trazas de otros compuestos presentes en el GRS sean en gran parte destruidas. La mayoría de sistemas de utilización proporcionan unas eficiencias de destrucción iguales o mayores que aquellas que se alcanzan mediante un sistema de antorcha en cilindro cerrado. En la figura 4.11 se puede observar una típica antorcha de cilindro cerrado.

Igual que con la mayoría de componentes del sistema, el costo de los sistemas de combustión es una función del diseño del sistema integral de administración del GRS y de los requerimientos de desempeño que se esperan de la combustión en sí misma. Existen dos diseños básicos para la combustión en una antorcha; la antorcha en un contenedor cerrado ya referida antes; y la antorcha abierta que quema el metano que emana directamente del residuo y sin ninguna clase de controles de la combustión. Aunque este segundo tipo de combustión es de uso común en muchas regiones, no será tomado en cuenta dado que su uso no es aceptable cuando se tiene la intención de calificar para RCE.

Para dar una simple idea del costo, una antorcha abierta con capacidad para quemar 1000 m<sup>3</sup>/hora de GRS puede costar entre \$50,000 y \$100,000 dependiendo de los controles periféricos y las condiciones de seguridad requeridas. Para efectos comparativos, una antorcha de cilindro cerrado de similar capacidad tiene un costo de casi el doble. Algunos componentes tales como los sistemas de control y refractarios pueden variar sustancialmente en precio dependiendo de los requerimientos de desempeño que se necesiten.

Figura 4.11 Antorcha de cilindro cerrado



### Operación del sistema de recolección del GRS.

La recolección y utilización activa del GRS es muy efectiva en la mitigación de los impactos dentro y fuera del sitio, así como para reducir la liberación de GEI a la atmósfera. El potencial de captura del GRS depende principalmente de factores relacionados con el diseño, entre los cuales se pueden citar los siguientes:

- ❖ Configuración del sitio (profundidad del residuo, área del relleno, profundidad del agua subterránea);
- ❖ Diseño del sistema de impermeabilización de la base;
- ❖ Diseño del sistema de cobertura;
- ❖ Adición de humedad / recirculación de lixiviados; y
- ❖ Restricciones operacionales.

La configuración del sitio tiene gran incidencia en el potencial de recolección del GRS. Los rellenos que se llenan por encima del nivel natural tienden a tener áreas superficiales más grandes, y por lo tanto las posibilidades de emisiones de GEI son mayores. Por el contrario, los sitios que se llenan por debajo del nivel natural tienen mayor tendencia a que los GRS migren fuera del sitio pero a través de los suelos circundantes.

Un suelo de baja permeabilidad o un sistema de impermeabilización sintético, en combinación con un buen sistema de recolección de lixiviados, es benéfico tanto para controlar la migración del GRS como la acumulación de lixiviados dentro del residuo. Aunque el propósito principal de un sistema de impermeabilización sintético es mitigar los potenciales impactos sobre el agua subterránea mediante la recuperación de los lixiviados del fondo del residuo, este sistema cumple igualmente la función de controlar la migración de GRS.

La permeabilidad del sistema de cobertura final es un importante factor en el manejo del GRS y en el desempeño mismo del sistema. Coberturas de permeabilidad baja minimizan la ventilación de los GRS hacia la atmósfera, la entrada de aire hacia el residuo, y la infiltración de humedad. Una cobertura de baja permeabilidad puede ayudar también a mejorar el desempeño y las áreas de influencia de los pozos verticales de extracción.

La adición de humedad y una estabilización rápida del residuo marcan la actual tendencia en la recuperación del GRS. Esta opción se constituye en la base de operación de la tecnología comúnmente conocida como "tecnología de bioreactor para rellenos sanitarios" (LBT, por sus siglas en Inglés). En este proceso lo que ocurre es un incremento de la cantidad de agua en contacto con el residuo, lo cual permite que se establezca más rápidamente y se presente un incremento inicial en la generación del GRS producido. No obstante, una vez el residuo es dispuesto se presenta un repentino decrecimiento en la tasa de generación. Este incremento en la tasa de producción inicial del GRS es benéfico para ciertos proyectos de utilización en la medida que permite un suministro mayor y una más alta eficiencia de las plantas. Pero por otra parte, esta alternativa puede acortar el período de ingresos del proyecto, afectando negativamente su viabilidad financiera, a menos que se programe una operación secuencial que corresponda con un programa de llenado mediante la implementación de una serie de celdas. Esta rápida estabilización puede también incrementar la migración y emisiones del GRS, por lo cual su principal aplicación es en sitios que cuentan con adecuada capacidad de recolección así como con membrana impermeable en la base y cobertura final como elementos complementarios de diseño.

La estabilización rápida debe ser cuidadosamente evaluada durante las etapas de diseño conceptual y preliminar del relleno. Como mínimo, los siguientes aspectos deben ser considerados:

- Incrementos en las tasas de producción del GRS durante un período de tiempo más corto;
- Incrementos en la recolección del GRS y capacidad de manejo;
- Mayores requerimientos de capacidad de destrucción (combustión y/o utilización);
- Incrementos en el asentamiento del relleno;
- Altos contenidos de humedad del gas, que implica volúmenes de condensados más altos;
- Acumulación de lixiviados dentro del relleno;
- Capacidad del sistema de recolección de lixiviados; y
- Efecto sobre las características de los lixiviados.

Las operaciones diarias tienen también una importante incidencia en la recuperación del GRS. Cuando se usa una cobertura diaria permeable (como por ejemplo arena), se presentan tasas más altas de infiltración de humedad, lo cual produce un residuo con un contenido de humedad más alto y un incremento en la tasa de producción del GRS. La secuencia y método de disposición del residuo influye también considerablemente en la definición del campo de recolección. Los canales horizontales de recolección del GRS son principalmente usados en sitios con cargas de residuos relativamente superficiales y sobre áreas grandes. En sitios donde se usa una cobertura diaria de baja permeabilidad, la estratificación y nivelación puede inducir la acumulación de agua en ciertas áreas de los bordes del relleno, lo cual a su vez puede incrementar los costos de recolección del GRS y las tasas de producción en ciertas áreas.

Es necesario hacer ciertas consideraciones especiales sobre aspectos asociados con la recolección de condensados, su remoción desde los sistemas de tuberías, pozos e instalaciones de utilización, y su posterior disposición. Es importante también establecer las implicaciones del asentamiento total y diferencial del residuo, el cual dependerá del diseño específico y de las condiciones de operación. El asentamiento total que puede esperarse en un relleno oscila entre 20 y 40 por ciento de la profundidad total del residuo después de su disposición y compactación inicial. En términos generales, un relleno típico de 30 metros de profundidad puede tener un asentamiento total entre 6 y 12 metros para el momento en que el proceso se completa. La tasa de asentamiento tiene su momento pico cuando el sitio está aún recibiendo residuos; lo cual implica que, tanto el asentamiento debido a la carga como a su descomposición alcanzan su punto máximo durante la vida activa del relleno. Como consideración en ese tipo de proyectos, el asentamiento diferencial es más importante que el total. El asentamiento puede ser mucho mayor y más rápido en ciertas áreas localizadas que en una zona típica, dependiendo del material dispuesto, el nivel de compactación, y otros factores tales como la entrada de aire o la infiltración de agua superficial. Los pozos verticales pueden también convertirse en problemas puntuales o localizados, por lo tanto su efecto debe tenerse en cuenta durante las fases de diseño, operación y mantenimiento.

### **Prácticas de buen manejo en operaciones de proyectos de administración del GRS que permiten maximizar el potencial de recuperación de energía.**

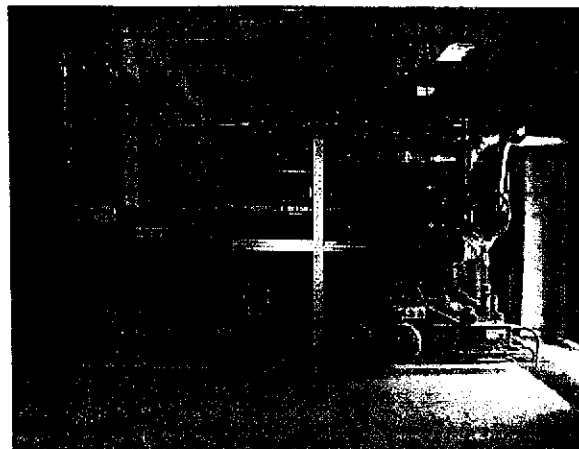
La optimización de la recolección del GRS tiene directa incidencia en la maximización del potencial de utilización, lo cual se traduce en beneficios económicos derivados de la venta de energía y la reducción de las emisiones de GEI. No obstante, es importante tener siempre presente que la operación del relleno en si misma es la que debe ser considerada como el propósito principal de las actividades en el sitio, y que todos los demás sistemas o actividades de apoyo, sean o no benéficas, son actividades subordinadas. Un problema que ha sido detectado a lo largo de la historia de los proyectos de administración del GRS es que la inapropiada operación del sistema de recolección puede ser un factor generador de incendios en el relleno y de la reducción de la cantidad de combustible, los primeros peligrosos para la salud pública y el segundo contra productivo para el sistema en conjunto. Por lo tanto, es importante entender bien las relaciones e interacciones entre el proceso de disposición de residuos y los sistemas de control, recolección y utilización, con miras a evaluar y prevenir todos los factores de riesgo, y sostener la viabilidad del proyecto a lo largo de un período productivo de 20 años o más.

#### **Motores de combustión interna (Motogenerador).**

Esta tecnología es muy adecuada para proyectos entre 0.5 MW y 12 MW o más, rango que corresponde al tamaño de la mayoría de los sitios potenciales. Los motores de combustión interna son más pequeños en tamaño que las turbinas y permiten hacer pequeños incrementos de capacidad con un costo de capital bajo a medida que avanza el desarrollo del proyecto en concordancia con la producción del GRS en el sitio.

La tecnología de motores de combustión interna es confiable y además los costos de operación y mantenimiento han disminuido considerablemente desde su adaptación inicial para uso con combustible de GRS durante los años 80's y 90's. La siguiente fotografía (figura 4.12) muestra un ejemplo de un motor de combustión interna tipo Jenbacher que ha sido usado para generar energía eléctrica en el relleno de Estambul en Turquía.

*Figura 4.12 Ejemplo de motogenerador*



El costo de capital de un paquete motor-generador está en el rango entre \$600,000 y \$800,000 por MW de capacidad de generación dependiendo del tamaño de las instalaciones y del tipo de motor que sea seleccionado para la aplicación específica. Representan entre el 40 y el 60% del costo total de las instalaciones generadoras de energía eléctrica, y aún sin tener en cuenta los costos del sistema de recolección, los cuales también deben ser considerados por separado.

Un análisis costo/beneficio para el ciclo de vida del proyecto que incluya una evaluación realista de la disponibilidad de la planta para una ubicación geográfica determinada, debe considerar los siguientes aspectos: acceso a la experiencia técnica requerida; acceso a las partes de repuesto que requiere el sistema; y alcance y cantidad de repuestos que se pueden mantener en almacenamiento en las instalaciones. Las pérdidas de tiempo en la producción pueden cambiar dramática y rápidamente la viabilidad económica de un proyecto.

#### 4.4 Desempeño de equipo de plantas con base a biogás.

##### Campo de recolección del GRS.

Un sistema de recuperación del GRS bien diseñado, construido y operado puede recolectar 75 por ciento o más del GRS producido en el relleno. Es muy importante que un sistema de recolección se diseñe y opere de tal manera que se ajuste a la variación en la tasa de generación del GRS, pero sin llegar a sobredimensionar o subdimensionar el campo de recolección. La tasa efectiva de generación del GRS también varía en cierto grado dentro de períodos de tiempo cortos en función de factores tales como; las condiciones meteorológicas, el asentamiento diferencial, las eficiencias de los equipos, y las condiciones de cobertura del sistema. El campo de recolección del GRS debe monitorearse y calibrarse periódicamente para optimizar la efectividad del sistema en conjunto. En este sentido, es necesario ajustar periódicamente las posiciones de las válvulas para reducir o incrementar los flujos del GRS desde las áreas de producción bajas o altas y maximizar así la recolección, pero sin llegar a sobrecargar aquellas áreas del relleno que pueden ser susceptibles de entrada de aire. Un principio que frecuentemente es malentendido o ignorado, aún por aquellos vinculados a la industria del GRS, es que la operación de un canal o pozo se debe basar únicamente en la calidad del gas en ese canal o pozo individual. La operación de un canal o pozo con base en las tasas de recuperación o el desempeño esperado del sistema puede resultar contra productivo.

La entrada de aire dentro del relleno debe ser minimizada debido a que tiene un impacto negativo sobre la descomposición natural del residuo. Dentro de meses siguientes a la disposición, por lo general el residuo alcanza una fase estable de descomposición anaeróbica. En este punto, la introducción de oxígeno vuelve el entorno bajo condiciones aeróbicas, dando como resultado: una reducción en la generación de metano con la consecuente declinación en la recuperación de combustible; incrementos localizados en las tasas de asentamiento diferencial; temperaturas más altas en el residuo ubicado debajo de la superficie; y un potencial aumento de olores. Esta situación puede también originar incendios en el relleno con el consecuente riesgo de que se extiendan hacia otras zonas circundantes.



Los parámetros a monitorear en cada uno de los puntos de recolección (cabezales de pozos y canales) son los siguientes:

- Succión;
- Presión diferencial;
- Temperatura;
- Composición del GRS (contenido de metano y O<sub>2</sub>); y
- Posición de la válvula

El monitoreo de cada punto de recolección empieza con la medida de la presión y succión para evitar interferencia con la acción de extracción de la muestra del GRS. Los datos esenciales del monitoreo son la succión, la composición del gas y la posición de la válvula. A continuación se indican lecturas típicas, bajo condiciones ideales de operación, que maximizan la recuperación de energía en cada punto de recolección:

- ❖ Succión máxima de 20 pulgadas de columna de agua;
- ❖ Metano, entre el 45 y 55 por ciento en volumen;
- ❖ O<sub>2</sub>, menos de 2 por ciento en volumen.

En la tabla 4.5 se presenta una herramienta útil de diagnóstico que facilita la identificación y solución de algunos de los problemas más comunes que se presentan en la operación de instalaciones de recolección y utilización de GRS.

Tabla 4.5 Problemas Comunes en la Recuperación del Combustible y del Sistema de Recolección.

Diagnóstico	Posibles Causas y Resultados	Solución Recomendada
O <sub>2</sub> > 2%	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Dilución de combustible de GRS lo cual reduce la recuperación de energía</li> <li>➤ Temperaturas sub-superficiales altas</li> <li>➤ Problemas de olores</li> <li>➤ Incendios en el relleno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ajustar y calibrar válvulas con base en la calidad del gas.</li> <li>➤ Checar señales de asentamiento diferencial en el cabezal del pozo.</li> </ul>
CH <sub>4</sub> < 45 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Los mismos anteriores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ajustar y calibrar válvulas con base en la calidad del gas.</li> <li>➤ Checar señales de asentamiento diferencial en el cabezal del pozo.</li> </ul>
CH <sub>4</sub> > 55 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Incremento en el contenido de energía por unidad de GS recuperado</li> <li>➤ Problemas de olores</li> <li>➤ Incremento de emisiones y fugas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ajustar y calibrar válvulas con base en la calidad del gas.</li> <li>➤ Si calidad y cantidad de gas, indican que hay más gas en el área, agregar más pozos al sistema.</li> </ul>

Como parte del programa regular de monitoreo las válvulas de la corona del pozo se deben ajustar hasta maximizar su efectividad. Este ajuste se debe hacer con base en la revisión de los datos históricos de desempeño y dentro del contexto de la operación del campo en conjunto. Cualquier considerable variación en las lecturas de succión del programa de monitoreo puede ser una señal de defectos en la tubería de recolección, tales como, roturas o inundación de la tubería debido a un excesivo asentamiento. Por lo tanto, todos los datos recolectados deben revisarse en su totalidad.

En un relleno sanitario ya cerrado el potencial de generación de GRS disminuye con el tiempo, por consiguiente ciertas áreas del sitio pueden requerir reducir la

recolección del gas de tal manera que sea consistente con disminución en la generación. En rellenos activos el potencial de generación aumenta durante unos pocos años después del cierre. Por lo tanto, el diseño del sistema de recolección del GRS en un sitio activo debe permitir progresivas expansiones para acomodarse al incremento en la generación.

#### Planta de recolección del GRS.

Una apropiada operación y un regular mantenimiento de la planta de recolección (incluyendo el retiro de condensados, sopladores, y equipo de combustión) mejora la eficiencia del sistema de recolección y maximiza la vida útil del equipo.

Se debe llevar a cabo una inspección regular en la planta de recolección para registrar el flujo de gas, la temperatura de combustión, las concentraciones de oxígeno y combustible en el GRS, rangos de temperatura, tiempos de operación del motor y otros parámetros.

#### Planta de generación de energía eléctrica.

La eficiencia para la conversión de energía, la cual es una indicación de qué parte del valor de la energía del GRS puede ser convertida en energía eléctrica, varía con cada tecnología, y puede ser descrita en términos de la "tasa de calor" neta de la planta (J/kWh) o eficiencia total del equipo. Esta eficiencia es igual al valor de energía total en el GRS recolectado dividido por el valor de energía en la carga suministrada a la red. La potencia neta suministrada a la red es igual a la salida total del generador menos las pérdidas parasitarias en la planta. Estas pérdidas incluyen la energía consumida por los compresores de gas, las bombas de agua, las bombas de aceite lubricante, los ventiladores del radiador y del generador, el transformador de la estación, y otras estaciones auxiliares.

En la tabla 4.6 se presentan los rangos típicos de flujo que se requieren para la implementación de tecnologías viables de generación de energía eléctrica. Esta tabla también muestra los rangos de energía típicos asociados con las diferentes tecnologías y tasas de flujo.

Tabla 4.6 Tecnologías de Utilización de GRS y Rangos Típicos de Flujo/Potencia.

Tecnología	Rango Típico de Flujo (pies cúbicos minuto)	Tamaño Preferido de la Planta	Eficiencia de Conversión Eléctrica
Microturbinas	< 100	< 100 kW	25% - 30%
Motores de combustión Interna	150 < flujo < 5,000	0.5 a 12MW	32% - 40%
Turbinas de Gas	4,000 < flujo < 20,000	3 a 18MW	26% - 32%
Turbinas de Vapor	> 6,000 a más de 25,000	10 a 18MW	24% - 29%
Sistemas de ciclo combinado	> 5,000 a más de 25,000	> 10MW	38% - 45%

Después de haber tratado los elementos y principios de funcionamiento de una planta de generación de energía eléctrica con base a biogás, nos adentraremos a realizar un análisis económico que permita verificar la rentabilidad de un proyecto de este tipo, haciendo uso de herramientas financieras como el Valor Presente Neto y la Tasa Interna de Retorno.

## CAPÍTULO 5

# ASPECTOS ECONÓMICOS DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD DE PLANTAS CON BASE A BIOGÁS

En este capítulo, se construye un modelo que sirve para establecer el aspecto de factibilidad económica de este tipo de proyectos en pesos corrientes de 2002.

### 5.1 Costos de inversión, operación y mantenimiento.

Para este estudio, se tomaron como referencia los costos de inversión, operación y mantenimiento publicados por el Banco Mundial, en un reporte acerca del proyecto desarrollado en México<sup>14</sup> que lleva el nombre de Sistema Metropolitano de Procesamiento de Desechos Sólidos (SIMEPRODESO), y que tiene las siguientes características:

- Locación: Salinas Victoria, Nuevo León, México.
- Población beneficiada: Aproximadamente 2,000,000.
- Volumen Anual promedio de desperdicios recibidos: 830,000 ton.
- Tipo de desperdicios recibidos en celdas de extracción de gas: Doméstico y comercial. (Desperdicios industriales y de construcción son colocados en otras celdas).
- Año de Inicio de llenado de las celdas: 1991
- Año de llenado de celdas: 1999
- Volumen total de desperdicios colocados en las celdas de extracción de gas: 7,698,057 ton
- Producción estimada de extracción de GRS de las celdas: 313 millones de metros cúbicos durante la vida del proyecto.
- Porcentaje de gas Metano: 50-60% CH<sub>4</sub>
- Capacidad de generación: 7MW
- Puesta en marcha: Mayo del 2002
- Vida útil del proyecto: 20 años

La planta cuenta en la actualidad con el siguiente equipo instalado:

- 3 motogeneradores Jenbacher 620 y un motogenerador Jenbacher 320 con las siguientes características:

Tabla 5.1 Características de motogeneradores instalados.

MODELO	POTENCIA ELÉCTRICA (KW)	RENDIMIENTO ELÉCTRICO (%)
JMS320 GS-B. L	1.048	38,9
JMS620 GS-B. L	2.118	38,4

Fuente: Jenbacher España.

- 3 bombas de gas y quemadores Organics.
- Más de 250 pozos de gas distribuidos sobre un área de 44Ha.
- 2,500 metros de tubería colectora principal.
- 16,000 metros de tubería colectora secundaria.

<sup>14</sup> Reporte No.: 22112 ME del Banco Mundial.

Los gastos de inversión se estimaron en US\$ 11,800,000, los cuales se desglosan como se explica a continuación:

- Sistema de Relleno sanitario y sistema de recolección de GRS: US\$ 2,300,000.00 de 1991 a 1999.
- Diseño y construcción de la planta para captura y uso de gas Metano (planta de tratamiento de GRS, planta de generación de energía eléctrica, subestación eléctrica, capacitación de personal) US\$ 9,200,000.00 de 2000 a 2002.
- Manejo y Administración del proyecto US\$ 300,000.00 de 2000 a 2002.

Para estimar los gastos de inversión del relleno sanitario en pesos mexicanos, se calculó el valor futuro (VF) de la inversión de 1991 a 1999 utilizando el promedio obtenido del tipo de cambio entre el peso mexicano y el dólar americano de la siguiente manera:

Tabla 5.2 Tipo de cambio entre el peso mexicano y el dólar americano de 1991 a 1999.

Año	Tipo de Cambio (\$)
1991	3.03
1992	3.14
1993	3.26
1994	3.41
1995	6.6
1996	7.65
1997	8.03
1998	9.35
1999	9.7

Banco de México. Indicadores Económicos.

El promedio de tipo de cambio fue de \$ 6.02 por cada dólar americano, por lo que la inversión de 1991 a 1999 fue \$ 13,839,688, de manera que la inversión anual se estima de \$ 1,537,743.

Para calcular el VF se utilizó la siguiente ecuación para una tasa de descuento  $i=16\%$ :

$$VF = A \left[ \frac{(1+i)^N - 1}{i} \right]$$

donde:

VF = Valor Futuro

A = Gasto Anual

i = tasa de descuento = 16 %

N = número de períodos o años

De lo anterior, se obtuvo que VF = \$ 26,938,964 de pesos de 1999.

A continuación se estimara el Valor Futuro de la inversión anterior hasta el año 2002, debido a que en ese año el proyecto comenzó a entrar en operación.

$$V.F. = \$ 31,479,078 \text{ en pesos del 2002. ....(I)}$$

Para la inversión de US\$ 9,500,000 en el diseño, construcción y administración del proyecto, de 2000 a 2002 se calculó el promedio del tipo de cambio entre el peso mexicano y el dólar americano correspondiente:

Tabla 5.3 Tipo de cambio entre el peso mexicano y el dólar americano de 2000 a 2002.

Año	Tipo de Cambio (\$)
2000	9.60
2001	9.42
2002	9.85

Fuente: Banco de México. Indicadores Económicos.

El promedio de tipo de cambio fue de \$ 9.62 por cada dólar americano, por lo que el costo de inversión del año 2000 al 2002 en pesos se estimó en \$ 91,421,667.

El valor futuro de la inversión anterior es de:

$$VF = \$ 106,829,265 \text{ en pesos de 2002 ....(II)}$$

Por lo tanto la inversión total del proyecto en moneda constante es la suma de la inversión de 1991 a 1999 (ecuación I) más la inversión de 2000 al 2002 (ecuación II), o sea:

$$\$ 31,479,078 + \$ 106,829,265 = M\$ 138.31 \text{ de pesos de 2002.}$$

Aplicando las tasas de inflación mostradas en la Tabla 5.4 a la inversión del 2002, para pasar la inversión a pesos del 2005, tenemos:

$$\text{Inversión total} = M\$ 140.24 \text{ en pesos del 2005.}$$

Tabla 5.4 Tasas de Inflación.

Año	Tasa de Inflación
2002	0.46%
2003	0.33%
2004	0.42%
2005	0.18%

Banco de México. Indicadores Económicos.

Los costos de Operación y Mantenimiento, proyectados en pesos mexicanos, se muestran a continuación en la tabla 5.4:

Tabla 5.5 Costos de Operación y Mantenimiento en el 2002.

Año	Gastos O&M (M\$)
2002	14.8
2003	14.8
2004	14.8
2005	14.8
2006	17.0
2007	14.1
2008	13.7
2009	13.1
2010	12.0
2011	22.8
2012	11.1
2013	10.9
2014	10.6
2015	10.2
2016	10.4
2017	9.1
2018	8.7
2019	8.5
2020	8.3
2021	8.0

Fuente: Banco Mundial.

Tomando como base los costos de Operación y Mantenimiento del 2002 (Tabla 5.5) se procedió a realizar una estimación de éstos en pesos del 2005, los gastos resultantes se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 5.6 Costos de Operación y Mantenimiento en el 2005.

Año	Gastos O&M (M\$)
2002	15.0
2003	15.0
2004	15.0
2005	15.0
2006	17.2
2007	14.3
2008	13.9
2009	13.3
2010	12.2
2011	23.1
2012	11.3
2013	11.1
2014	10.7
2015	10.3
2016	10.5
2017	9.2
2018	8.8
2019	8.6
2020	8.4
2021	8.1

## 5.2 Costos de transacción de proyectos MDL.

Se entiende por costos de transacción a todos los costos adicionales a los que normalmente incurre un proyecto (capital y operativos), necesarios para cumplir con su ciclo de aprobación como MDL, desde su etapa de diseño hasta la expedición de los CRE. Puede decirse que existen numerosos factores que inciden en su estimación, resultando difícil plantear escenarios y alternativas que abarquen todas las opciones.

### 5.2.1 Costos de transacción por etapas del ciclo de aprobación.

Existen varios factores que repercuten en los costos de transacción de un proyecto MDL, los cuáles son más o menos significativos dependiendo del tamaño del mismo, de la mayor o menor utilización de personal local para los procesos de diseño, implementación y vigilancia, del pago por adelantado o diferido de los costos de validación hasta que el proyecto esté operando, de la necesidad o no de que los certificados sean comercializados a través de un agente de negocios (broker), etc.

Como regla general puede afirmarse que los costos de transacción no son directamente proporcionales al tamaño del proyecto. En ese sentido cuanto mayor número de créditos genere, menos será la incidencia de los costos de transacción en los ingresos generados, y mayor motivación tendrá el inversor en el desarrollo del proyecto MDL. Teniendo en cuenta esto, las autoridades del MDL han simplificado los requisitos para los proyectos de pequeña escala, con el objeto de facilitar su viabilidad atenuando el impacto de los costos de transacción en el valor total del proyecto.



La participación de agentes de negocios es importante en el caso de tratarse de proyectos, que generen certificados para ser vendidos en los mercados de carbono a Países Anexo I. Puede señalarse que el costo de comercialización con base a la opinión de los analistas, puede cuantificarse entre el 3% y el 15% del valor nominal de las RCE. Este porcentaje puede variar según las características del proyecto, como son el tipo de proyecto, el país de acogida, los riesgos implícitos del proyecto, etc.

Con base a estudios y análisis de los agentes del mercado, se expone en la Tabla 5.5 una evaluación de los costos de transacción para cada una de las fases del ciclo de aprobación.

Tabla 5.7 Estimación de los Costos de Transacción por etapas del ciclo de aprobación.

Fases ciclo	Actividades	Costos	
Diseño	<i>Diseño conceptual y factibilidad:</i> - Diseño del proyecto de inversión - Metodología de la base de referencia - Metodología y Plan de vigilancia - Determinación período de acreditación - Cálculo de emisiones de GEI - Determinación de fugas - Evaluación de impacto ambiental	US\$ 20,000 – US\$ 60,000 <sup>A</sup>	
	<i>Elaboración:</i> - Elaboración del documento DDP - Proceso de aprobación a nivel nacional	US\$ 5,000 – US\$ 40,000	
Validación	<i>Proceso de evaluación de la Entidad Operacional Designada (EOD) para comprobar si ajusta a los requisitos del MDL</i> - Confirma cumplimiento de requisitos - Confirma recepción de declaración nacional - Hace público el documento del proyecto - Hace público las observaciones - Toma decisión sobre validación - Envía informe de validación a la Junta Ejecutiva - Hace público el informe de validación	US\$ 15,000 – US\$ 40,000 <sup>A</sup>	
Negociación de Contrato	<i>Redacción del Contrato de Compra – Venta de RCE</i> - Términos legales de cumplimiento del contrato - Definición de la propiedad de los Certificados - Quién y cómo se enfrentan los riesgos - Condiciones de compra y venta	Proceso largo y costoso <sup>A</sup> US\$ 10,000 – US\$ 40,000	
Registro	<i>Aceptación oficial por la Junta Ejecutiva de un proyecto validado – MDL</i>  Gastos administrativos <sup>B</sup> Escala definida en base a toneladas promedio anuales de CO2 reducidas en el período de acreditación del proyecto.	tCO <sub>2</sub> e <= 15,000	US\$5,000
		15,000 < tCO <sub>2</sub> e <= 50,000	US\$10,000
		50,000 < tCO <sub>2</sub> e <= 100,000	US\$15,000
		100,000 < tCO <sub>2</sub> e <= 200,000	US\$20,000
		tCO <sub>2</sub> e > 200,000	US\$30,000

Continuación Tabla 5.7 Estimación de los Costos de Transacción por etapas del ciclo de aprobación.

Vigilancia	<p><i>Participantes recopilan y archivan datos para:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Estimar y medir las emisiones del proyecto</li> <li>- Determinar las emisiones de la línea base</li> <li>- Determinar emisiones fuera del proyecto</li> </ul> <p><i>Cálculo de RCE</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Emisión del proyecto + Fugas – Emisión de la línea base</li> </ul>	<p>Costos para Vigilancia, Verificación y Certificación<sup>C</sup></p> <p>US\$ 3,000 – US\$ 15,000 anuales</p>
Verificación	<p>Elaboración informe de vigilancia para la Entidad Operacional Designada (EOD)</p> <p><i>Actividades de la EOD<sup>D</sup></i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Informe de vigilancia a disposición pública</li> <li>- Realiza inspección "in situ"</li> <li>- Examina los resultados de la vigilancia</li> <li>- Comprueba aplicación correcta de metodología</li> <li>- Verifica documentación sea completa y correcta</li> <li>- Recomienda modificaciones a la metodología</li> <li>- Determina la reducción de emisiones</li> <li>- Presenta <i>informe de verificación</i> y se hace público</li> </ul>	
Certificación	<p><i>La EOD certifica las emisiones reducidas</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Elabora y envía el <i>informe de certificación</i></li> <li>- Pone el informe a disposición del público</li> </ul> <p>Confirma por escrito la reducción de emisiones</p>	
Expedición Certificados	<p><i>La Junta Ejecutiva expide las RCE y registra</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Revisa, Expide, Registra.</li> <li>- <i>Fondo de adaptación</i> para actividades en los países de menor desarrollo relativo (ver anexo F).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gastos administrativos según tabla Junta Ejecutiva</li> <li>- 2% fondo adaptación<sup>E</sup></li> </ul>
Venta RCE	<i>Gastos de comercialización</i>	3% - 15% sobre valor Certificados

Fuentes:

<sup>A</sup> Con base en las características del proyecto, ubicación, etc. Fuente de información Danish Energy Authority, EcoSecurities. Otro ejemplo: la empresa D.N. Veritas ha efectuado la validación de un proyecto chileno y brasileño a un costo de US\$ 25.000,00 cada uno – fuente "Estudio de apoyo a la aplicación del MDL del Protocolo de Kyoto en Uruguay", Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (Uruguay).

<sup>B</sup> Sexta reunión de la Junta Ejecutiva, Octubre 2002.  
[http://cdm.unfccc.int/pac/howto/CDMProjectActivity/Register/Reqfee\\_version02.pdf](http://cdm.unfccc.int/pac/howto/CDMProjectActivity/Register/Reqfee_version02.pdf)

<sup>C</sup> Elaborados sobre datos de Danish Energy Authority, EcoSecurities

<sup>D</sup> Actividades muy similares a las realizadas para certificar Sistemas de Gestión Ambiental. Estos costos están estimados para proyectos grandes o medianos.

<sup>E</sup> En cuanto a los Cargos por adaptación, éstos se han establecido en el 2% sobre el valor de los Certificados de Carbono, servirán para ayudar a los países considerados como los más vulnerables, es decir, los países considerados de menor desarrollo en las Modalidades y Procedimientos MDL. Ver Anexo C.

A continuación se amplían algunas consideraciones sobre los costos asociados en varias etapas del ciclo de aprobación.

➤ **Diseño conceptual, factibilidad y elaboración del proyecto.**

Entre otros aspectos importantes, esta etapa comprende el diseño del proyecto, la definición de la metodología de base de referencia, la metodología y el plan de vigilancia, y la elaboración de documentos de presentación del proyecto y proceso de aprobación a nivel nacional. Los costos asociados a esta fase del ciclo de aprobación pueden ser internos o externos, según decida el promotor. En cualquier caso la metodología de cálculo de la base de referencia requiere en muchos casos de la experiencia y conocimientos de empresas internacionales que hagan el seguimiento del proceso de presentación y aprobación que realiza la Junta Ejecutiva del MDL.

➤ **Validación, verificación y certificación a cargo de las Entidades Operacionales Designadas (EOD).**

El trabajo debe ser llevado a cabo por dos empresas especializadas en evaluaciones independientes sobre el cumplimiento de los requisitos del MDL. Las compañías deben ser Entidades Operacionales Designadas legalmente acreditadas por la conferencia de las Partes. En general, las actividades técnicas de estas etapas son similares a las realizadas para certificar los Sistemas de Gestión Ambiental, dependiendo principalmente sus costos de sus costos de la ubicación, complejidad y tamaño del proyecto.

En el caso de proyectos MDL que no sean de pequeña escala, una misma EOD no puede realizar la validación y verificación del proyecto. La necesidad de contar con dos EOD distintas es motivo de encarecimiento de los costos por lo general.

➤ **Gastos administrativos, registro de certificados y cargos por adaptación**

La Junta Ejecutiva del MDL cobra por Gastos de administración y registro de las RCE. Los Gastos de administración fueron establecidos por esta entidad en su 6ª Reunión de Octubre de 2002, de acuerdo a una escala definida según las toneladas promedio anuales de CO<sub>2</sub> reducidas en el período de acreditación, pagadero por una sola vez cuando el proyecto se registra. En el caso de proyectos pequeños, la escala contempla unos costos menores para atenuar el impacto de sus costos de transacción. Asimismo se admite el agrupamiento de varios proyectos pequeños para reducir los gastos administrativos de registro.

La Junta Ejecutiva del MDL estableció la posibilidad de que en un futuro se pueda revisar la escala de porcentaje de gastos para proyectos de reducida dimensión<sup>15</sup>. Los cargos por adaptación, se han establecido en el 2% sobre el valor de los Certificados de Carbono, y servirán para crear un fondo de ahorros para apoyar a los países considerados más vulnerables, es decir, los países considerados con menor desarrollo económico relativo (ver anexo C), que deseen participar en el desarrollo de proyectos MDL.

<sup>15</sup> En este sentido se recomienda ver la página web de la UNFCCC (<http://unfccc.int/2860.php>) – Clean Development Mechanism.

Para nuestro estudio, los valores base del proyecto son los siguientes:

**Valores base del proyecto.**

- Valor de la Inversión: \$140,241,555
- Factor de Emisión: 0.584 tonCO<sub>2</sub>/MWh<sup>16</sup>
- Energía anual producida: 51.5 GWhe/año (promedio en 20 años)
- Reducción Emisión Anuales: 166,211.2 tonCO<sub>2</sub>e (promedio en 20 años)
- Vida útil: 20 años
- Tasa de descuento: 16%
- Valor de las RCE: 5.36 US\$/tCO<sub>2</sub>e en el caso base<sup>17</sup>
- Clasificado como Tipo I de proyectos de pequeña escala.

Por lo que los costos de transacción iniciales se estiman en \$ 880,000.00<sup>18</sup> como se desglosa a continuación.

*Tabla 5.8 Costos de transacción iniciales.*

Fases ciclo	Costos (US\$)	Costo (\$)
Diseño y Elaboración	25,000	277,000*
Validación	15,000	155,000*
Neg. De Contrato	10,000	110,000*
Registro	30,000	330,000*
<b>Total</b>	<b>80,000</b>	<b>880,000*</b>

\*Tipo de cambio de \$11.00/US\$.

Estos costos iniciales se agregaran a los costos de inversión que se estimaron anteriormente.

Los gastos de Vigilancia, Verificación y de Certificación entran dentro de los gastos de operación y mantenimiento, debido a que son gastos que se presentan anualmente.

Para efectos de simplificación de este estudio, se seleccionó únicamente el período de acreditación fijo de 10 años, por lo que los costos de transacción anuales, que se tomarán en cuenta únicamente durante los primeros diez años como se explicó en la sección 3.9 y se muestran en la siguiente tabla:

*Tabla 5.9 Gastos de Vigilancia, Verificación y de Certificación.*

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Costos de Vigilancia verificación y Certificación en dólares.	\$US 3,000	US\$ 3,000	US\$ 3,000	US\$ 3,000	US\$ 3,000	US\$ 3,000	US\$ 3,000	US\$ 3,000	US\$ 3,000	US\$ 3,000

Nota: Tipo de Cambio a \$11/US\$

<sup>16</sup> Fuente Capítulo 4 de la guía para la implementación de los Mecanismos flexibles de Kyoto-MDL en Latinoamérica y el Caribe. Enero 2005.

<sup>17</sup> Más adelante se discutirán las razones para fijar el precio base de las RCE's en US\$ 5.36/tCO<sub>2</sub> equivalente y se asume que dicho nivel es neto después de los costos de comercialización.

<sup>18</sup> Para tipo de cambio de \$11.00/US\$.

Los cargos de Adaptación son los que se usan para financiar costos de adaptación a países más vulnerables como se explicó en el capítulo 5.2.1 y son los siguientes:

Tabla 5.10 Cargos de Adaptación.

Año	Gastos en (M\$)
2002	0.34
2003	0.32
2004	0.30
2005	0.28
2006	0.26
2007	0.25
2008	0.23
2009	0.22
2010	0.20
2011	0.19
TOTAL	2.59

Fuente Propia

Resultados:

➤ Valor Actual Costos de Vig., Verif. y Certif.	\$ 330,000
➤ Costos de Transacción Totales	\$ 880,000
➤ Gastos por Adaptación Totales	\$ 2,585,303
➤ Porcentaje Costos Transacción /Inversión Total	1.84 %

Por lo tanto los gastos totales de Transacción, Operación y Mantenimiento estimados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.11 Gastos Totales de Transacción, Operación y Mantenimiento.

Años	Gastos Totales O&M (M\$)
2002	15.4
2003	15.4
2004	15.3
2005	15.3
2006	17.5
2007	14.6
2008	14.2
2009	13.5
2010	12.4
2011	23.3
2012	11.3
2013	11.1
2014	10.7
2015	10.3
2016	10.5
2017	9.2
2018	8.8
2019	8.6
2020	8.4
2021	8.1

### 5.3 Ingresos por venta de energía eléctrica.

Para calcular la producción de energía eléctrica en este estudio, se tomaron en cuenta las siguientes variables:

- Eficiencia del sistema de recolección de GRS.  
Del proyecto, se obtuvieron los siguientes datos del GRS recolectado. Se consideró que la eficiencia de recolección es del 80% (20% fugado) como se muestra en la tabla 5.12.
- Porcentaje de gas metano capturado.  
La cantidad de gas metano capturado es del 50% del GRS recolectado como se muestra en la tabla 5.12.
- Poder calorífico del gas metano.  
El poder calorífico del gas metano es de 8,460kcal/m<sup>3</sup>
- Eficiencia de los motogeneradores.  
Se fija en 40% según tabla 4.6 del capítulo 4.

Considerando los puntos anteriores, la generación de energía eléctrica del proyecto es:

Tabla 5.12. Energía eléctrica generada en el proyecto.

Año	GRS Recolectado (Mm <sup>3</sup> )	80% de GRS (Mm <sup>3</sup> )	Metano Capturado 50% (Mm <sup>3</sup> )	Energía Eléctrica (GWhe)
2002	57.2	42.7	22.88	90.1
2003	53.4	40.0	21.36	84.1
2004	50.0	37.4	20.00	78.8
2005	46.8	35.0	18.72	73.7
2006	43.8	32.8	17.52	69.0
2007	41.0	30.7	16.40	64.6
2008	38.4	28.8	15.36	60.5
2009	36.0	26.9	14.40	56.7
2010	33.6	25.3	13.44	52.9
2011	31.6	23.2	12.64	49.8
2012	29.0	22.1	11.60	45.7
2013	27.6	20.6	11.04	43.5
2014	25.8	19.4	10.32	40.6
2015	24.2	18.1	9.68	38.1
2016	22.6	17.0	9.04	35.6
2017	21.2	15.8	8.48	33.4
2018	19.8	14.9	7.92	31.2
2019	18.6	13.9	7.44	29.3
2020	17.4	13.1	6.96	27.4
2021	16.4	36.6	6.56	25.8

### 5.3.1 Cálculo de tarifa eléctrica.

En este estudio, por simplicidad, se tomó como base para el cálculo de los ingresos por venta de energía eléctrica el promedio de las tarifas de Alta tensión nivel transmisión (HT) en el área central, de Diciembre de 2004 al mes de Abril de 2005<sup>19</sup>, como se muestran a continuación en la tabla 5.13.

Tabla 5.13 Tarifas de alta tensión nivel transmisión (HT).

Mes	Región	Cargo por kWh de energía punta	Cargo por kWh de energía intermedia	Cargo por kWh de energía base
Dic. 04	Central	\$ 2.2975	\$ 0.5852	\$ 0.5416
Ene 05	Central	\$ 2.3726	\$ 0.6043	\$ 0.5593
Feb. 05	Central	\$ 2.2739	\$ 0.5792	\$ 0.5360
Mar. 05	Central	\$ 2.2468	\$ 0.5723	\$ 0.5296
Abr. 05	Central	\$ 2.1870	\$ 0.5571	\$ 0.5155
Promedio	Central	\$ 2.2756	\$ 0.5796	\$ 0.5364

Fuente CFE

Las tarifas de CFE varían de acuerdo a la fecha y al horario como se muestra a continuación:

Tabla 5.14 Tarifas CFE del 1º de febrero al sábado anterior al primer domingo de abril.

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 19:30 22:30 - 24:00	19:30 - 22:30
sábado	0:00 - 7:00	7:00 - 24:00	
domingo y festivo	0:00 - 19:00 23:00 - 24:00	19:00 - 23:00	

Fuente CFE

Tabla 5.15 Tarifas CFE del primer domingo de abril al 31 de julio.

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 19:30 22:30 - 24:00	19:30 - 22:30
sábado	0:00 - 7:00	7:00 - 24:00	
domingo y festivo	0:00 - 19:00 23:00 - 24:00	19:00 - 23:00	

Fuente CFE

Tabla 5.16 Tarifas CFE del 1º de agosto al sábado anterior al último domingo de octubre.

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 19:30 22:30 - 24:00	19:30 - 22:30
sábado	0:00 - 7:00	7:00 - 24:00	
domingo y festivo	0:00 - 19:00 23:00 - 24:00	19:00 - 23:00	

Fuente CFE

<sup>19</sup> Se eligió este periodo debido a la disponibilidad de información.

Tabla 5.17 Tarifas CFE del último domingo de octubre al 31 de enero.

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 18:30 22:30 - 24:00	18:30 - 22:30
sábado	0:00 - 8:00	8:00 - 19:30 21:30 - 24:00	19:30 - 21:30
domingo y festivo	0:00 - 18:00	18:00 - 24:00	

Fuente CFE

Dado lo anterior, se calcularon las horas totales para cada tipo de tarifa y se dividieron por el número total de horas que tiene un año, obteniendo un factor para cada tipo de demanda que a su vez representan los precios por los que se multiplicarán las tarifas de esos periodos y resultan en:

Tabla 5.18 Factor para cada tipo de demanda de la tarifa HT.

Tarifa	Base	Intermedio	Punta
HT	0.1799	0.3334	0.2034

La suma de los factores anteriores para cada tipo de demanda arroja la tarifa promedio que emplearemos en nuestro estudio es de \$0.69/kWh.

Ahora bien en el proyecto se planea utilizar los motogeneradores como se muestra en la tabla 5.19, donde se aprecia que los factores de planta se ajustan conforme a la disponibilidad de GRS que generará el relleno sanitario durante su vida útil:

Tabla 5.19 Uso planeado de los motogeneradores.

AÑO	Energía Generada U1 (MWh)	Energía Generada U2 (MWh)	Energía Generada U3 (MWh)	Energía Generada U4 (MWh)
2002	14,892	14,892	14,892	7,446
2003	14,892	14,892	14,892	7,446
2004	14,892	14,892	14,892	7,446
2005	14,892	14,892	14,892	7,446
2006	14,090	14,892	14,892	7,446
2007	10,766	14,892	14,892	7,446
2008	7,722	14,892	14,892	7,446
2009	4,866	14,892	14,892	7,446
2010	2,150	14,892	14,892	7,446
2011	7,091	14,892	14,892	0
2012	4,234	14,892	14,892	0
2013	2,572	14,892	14,892	0
2014	4,420	14,892	14,892	0
2015	13,414	14,892	0	0
2016	11,634	14,892	0	0
2017	9,902	14,892	0	0
2018	8,310	14,892	0	0
2019	6,858	14,892	0	0
2020	5,454	14,892	0	0
2021	4,213	14,892	0	0

Fuente: Banco Mundial.



Multiplicando la tarifa HT estimada con anterioridad se obtienen los siguientes ingresos en millones de pesos:

Tabla 5.20 Ingresos estimados por venta de energía eléctrica.

Año	Ingresos U1 M\$	Ingresos U2 M\$	Ingresos U3 M\$	Ingresos U4 M\$	Ingresos Totales M\$
2002	10.3	10.3	10.3	5.1	36.0
2003	10.3	10.3	10.3	5.1	36.0
2004	10.3	10.3	10.3	5.1	36.0
2005	10.3	10.3	10.3	5.1	36.0
2006	9.7	10.3	10.3	5.1	35.4
2007	7.4	10.3	10.3	5.1	33.1
2008	5.3	10.3	10.3	5.1	31.0
2009	3.4	10.3	10.3	5.1	29.0
2010	1.5	10.3	10.3	5.1	28.4 <sup>s</sup>
2011	4.9	10.3	10.3	0.0	25.4
2012	2.9	10.3	10.3	0.0	23.5
2013	1.8	10.3	10.3	0.0	22.3
2014	0.3	10.3	10.3	0.0	20.9
2015	9.3	10.3	0.0	0.0	19.5
2016	8.0	10.3	0.0	0.0	18.3
2017	6.8	10.3	0.0	0.0	17.1
2018	5.7	10.3	0.0	0.0	16.0
2019	4.7	10.3	0.0	0.0	15.0
2020	3.8	10.3	0.0	0.0	14.0
2021	2.9	10.3	0.0	0.0	13.2
<b>TOTAL</b>	<b>120</b>	<b>206</b>	<b>134</b>	<b>46</b>	<b>506.1</b>

Fuente propia.

<sup>s</sup> Se planea vender el motogenerador de 1000 kWe (U4) a los diez años de uso (2011) en aproximadamente \$1,195,580.

#### 5.4 Ingresos adicionales atribuibles a las Reducciones Certificadas de Emisiones.

Los ingresos originados por la venta de RCE se calcularon tomando en cuenta la cantidad de CO<sub>2</sub> (en toneladas) que se emitirían a la atmósfera, para ello se consideró el Factor de Emisión (FE) del proyecto.

El FE indica la emisión de dióxido de carbono equivalente por unidad de energía producida (TJ) o electricidad generada (MWh) y se mide en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente por la electricidad generada (tCO<sub>2</sub>/MWh).

Los cálculos para este estudio, se realizaron considerando los siguientes escenarios:

- Sin la existencia de proyecto.
- Con la existencia de proyecto.

Cabe señalar que las estimaciones de emisiones han sido simplificadas, es decir, no se tomaron en cuenta los óxidos nitrosos (N<sub>2</sub>O) y metano (CH<sub>4</sub>) provocadas por combustión incompleta.

A. Sin la existencia de proyecto.

Para este caso, se tomaron en cuenta las emisiones liberadas a la atmósfera por los siguientes elementos:

- 100% de las emisiones de metano generado en el tiradero.
- Las generadas por una hipotética planta de ciclo combinado. Se consideró que dicha planta, tiene una eficiencia del 50% y que utiliza como combustible gas metano.

Las emisiones anuales generadas por estas dos fuentes se presentan a continuación:

*Tabla 5.21 Emisiones anuales generadas sin la existencia de proyecto.*

AÑO	Emisiones Tiradero Anuales (mtCO <sub>2</sub> e)	Emisiones Planta de Ciclo Combinado Anuales (mtCO <sub>2</sub> )	Emisiones Totales Anuales (mtCO <sub>2</sub> e)
2002	396.4	105.2	501.6
2003	370.1	98.2	468.2
2004	346.5	91.9	438.4
2005	324.3	86.0	410.4
2006	303.5	80.5	384.1
2007	284.1	75.4	359.5
2008	266.1	70.6	336.7
2009	249.5	66.2	315.7
2010	232.9	61.8	294.6
2011	219.0	58.1	277.1
2012	201.0	53.3	254.3
2013	191.3	50.7	242.0
2014	178.8	47.4	226.2
2015	167.7	44.5	212.2
2016	156.6	41.6	198.2
2017	146.9	39.0	185.9
2018	137.2	36.4	173.6
2019	128.9	34.2	163.1
2020	120.6	32.0	152.6
2021	113.7	30.2	143.8
<b>Total</b>	<b>4,535</b>	<b>1,203</b>	<b>5,738</b>

Fuente propia.

B. Con la existencia de proyecto.

Para este caso se consideraron las siguientes emisiones:

- 20% de emisiones de GRS del tiradero debido a pérdidas en el sistema de recolección.

- 80% de las emisiones del GRS son recolectadas. La parte correspondiente al gas metano (40% del 80% recolectado) es tratado y quemado por los motogeneradores y antorchas convirtiéndose en CO<sub>2</sub>. Cabe mencionar que la eficiencia de los motogeneradores es de 40% de acuerdo a los datos especificados en la tabla 4.6 y la eficiencia de las antorchas alcanzan valores hasta del 98%<sup>20</sup> (ver capítulo 4). La parte correspondiente al CO<sub>2</sub> del GRS son liberadas a la atmósfera.

Es importante señalar que las emisiones generadas por la hipotética planta de ciclo combinado en el escenario anteriormente descrito (A), serán desplazadas por las del proyecto MDL postulado, debido a que se está considerando que el proyecto MDL sustituirá a la planta de ciclo combinado.

Las emisiones anuales generadas en este escenario sólo son las atribuibles al gas metano (CH<sub>4</sub>), que como se sabe, tiene un potencial de calentamiento atmosférico de 21 veces más que el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y son traducidas en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes (CO<sub>2</sub>e), porque el CO<sub>2</sub> del GRS con o sin la existencia del proyecto se considerarán iguales y se eliminarán al hacer el cálculo de las reducciones de emisiones totales<sup>21</sup>. De esta manera las emisiones generadas en este escenario son las siguientes:

Tabla 5.22 Emisiones generadas con la existencia de proyecto.

Año	Emisiones Fugas CO <sub>2</sub> e Anuales (mton)	Emisiones CO <sub>2</sub> Proyecto Anuales (mton)	Emisiones Totales CO <sub>2</sub> e Anuales (mton)
2002	79.3	131.4	210.7
2003	74.0	122.7	196.7
2004	69.3	114.9	184.2
2005	64.9	107.5	172.4
2006	60.7	100.7	161.4
2007	56.8	94.2	151.0
2008	56.2	88.2	144.5
2009	49.9	82.7	132.6
2010	46.6	77.2	123.8
2011	43.8	72.6	116.4
2012	40.2	66.6	106.8
2013	38.3	63.4	101.7
2014	35.8	59.3	95.0
2015	33.5	55.6	89.2
2016	31.3	51.9	83.3
2017	29.4	48.7	78.1
2018	27.4	45.5	72.9
2019	25.8	42.7	68.5
2020	24.1	40.0	64.1
2021	22.7	37.7	60.4
<b>Total</b>	<b>910.0</b>	<b>1,503.8</b>	<b>2,413.8</b>

Fuente propia.

<sup>20</sup> Fuente NovaGerar Landfill gas to energy Project. EcoSecurities Ltd. Febrero de 2002.

<sup>21</sup> Las reducciones de emisiones totales se obtienen al restar las emisiones de las fuentes generadas sin la existencia del proyecto MDL menos las generadas con la existencia del mismo.

Es importante recordar que en este estudio se consideró que el proyecto MDL sustituirá a la planta de generación de energía eléctrica de ciclo combinado, por lo que, las emisiones de esta última, se dejarían de emitir. Esto significa que para calcular las reducciones de emisiones totales, se restan las emisiones de GEI provocadas por las fuentes en ausencia del proyecto menos las emisiones realizadas por las fuentes en presencia del proyecto como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5.23 Reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub>e.

Año	Emisiones Equivalentes Sin Proyecto Anuales (mton)	Emisiones Equivalentes Con Proyecto Anuales (mton)	Reducciones CO <sub>2</sub> (mton)
2002	501.6	210.7	290.8
2003	468.2	196.7	271.5
2004	438.4	184.2	254.2
2005	410.4	172.4	238.0
2006	384.1	161.4	222.7
2007	359.5	151.0	208.5
2008	336.7	144.5	192.2
2009	315.7	132.6	183.0
2010	294.6	123.8	170.8
2011	277.1	116.4	160.7
2012	254.3	106.8	147.5
2013	242.0	101.7	140.3
2014	226.2	95.0	131.2
2015	212.2	89.2	123.0
2016	198.2	83.3	114.9
2017	185.9	78.1	107.8
2018	173.6	72.9	100.7
2019	163.1	68.5	94.6
2020	152.6	64.1	88.5
2021	143.8	60.4	83.4
<b>Total</b>	<b>5,738.0</b>	<b>2,413.8</b>	<b>3,324.2</b>

De esta forma, el impacto del proyecto es de reducir las emisiones de GEI a la atmósfera la cantidad de 3.324 millones de ton de CO<sub>2</sub> equivalentes durante su vida útil y 2.192 millones de ton de CO<sub>2</sub> durante los primeros diez años.

Tomando como precio base de US\$ 5.36/ton CO<sub>2</sub>e y con un tipo de cambio de \$11.00/US\$, los ingresos atribuibles a la venta de RCE durante diez años son:

$$2.192 \text{ MtonCO}_2\text{e} * \text{US\$ } 5.36 * \$11.00 = \text{M\$ } 129.26$$

A esta cantidad se le restará el 2% por gastos de Adaptación, obteniendo:

$$\text{Ingresos por venta de RCE's} = \text{M\$ } 126.68$$

#### 5.4.1 La utilidad de operación y la depreciación:

La utilidad de Operación se calculó restando los gastos totales (gastos de transacción MDL, operación y mantenimiento) a los ingresos totales generados por la venta de energía y venta de RCE's como se muestra a continuación:

Tabla 5.24 Utilidad de operación del proyecto.

Año	Ingresos Totales (M\$)	Gastos Totales (M\$)	Depreciación <sup>22</sup> (M\$)	Utilidad de Op. antes de depreciación (M\$)
2002	52.77	15.38	9.02	37.38
2003	51.65	15.36	9.02	36.29
2004	50.65	15.34	9.02	35.31
2005	49.71	15.32	9.02	34.39
2006	48.28	17.53	9.02	30.74
2007	45.16	14.58	9.02	30.59
2008	42.12	14.15	9.02	27.97
2009	39.62	13.53	9.02	26.09
2010	38.24	12.40	9.02	25.84
2011	34.73	23.34	9.02	11.39
2012	23.47	11.26	0.02	12.22
2013	22.33	11.05	0.02	11.27
2014	20.86	10.75	0.02	10.11
2015	19.53	10.34	0.02	9.19
2016	18.30	10.55	0.02	7.76
2017	17.11	9.23	0.02	7.88
2018	16.01	8.82	0.02	7.19
2019	15.01	8.62	0.02	6.39
2020	14.04	8.42	0.02	5.62
2021	13.18	8.11	0.02	5.07

\*Fuente propia.

#### 5.4.2 Apalancamiento.

El apalancamiento financiero se utiliza cuando una empresa recurre a préstamo o deuda para complementar capital común de accionistas para financiar su empresa. Contrario a lo que algunos creen el financiamiento proveniente de accionistas es más caro en el largo plazo que el proveniente de deuda a largo plazo, esto debido a que las expectativas de rendimientos o dividendos de los accionistas por poner en "juego" su dinero o en riesgo es mayor que el que pone dinero en préstamo, ya que un accionista

<sup>22</sup> Depreciación: Disminución del valor o precio de un bien. La depreciación es una pérdida en el valor material o funcional del activo fijo tangible, (no sujeto a agotamiento y la cual se debe fundamentalmente al uso y desmejoramiento del bien). La teoría dice que la depreciación es distribuir el costo de un bien entre los años de vida útil de éste. Las cifras mostradas proceden del valor de los activos de SIMPRODESO.

es el último que cobra, por lo que este capital es de riesgo. Esto no significa que el que preste dinero no tenga riesgo, pero en términos generales son menores al de un accionista. Por lo tanto, financiarse a largo plazo con préstamo es más barato que financiarse con capital común de accionistas, ya que, el interés que paga la empresa al acreedor, es decir, quien otorga el préstamo, deduce una parte de impuestos, lo que se traduce que el fisco (Gobierno) absorbe parte del interés. Esto trae como consecuencia que una empresa que tiene deuda tenga un impuesto sobre la renta (ISR) más bajo, en comparación del que se financió vía capital común, debido a que los dividendos no son deducibles.

Por ejemplo si las empresas A y B tienen utilidades antes de impuestos e intereses de 1,000; y la A contrata deuda y la B solo se financia a través de capital. La empresa A tendrá una deducción de intereses que B no tendrá, si los intereses de A son 300 pesos y el impuesto es del 35 % la empresa A pagará el impuesto sobre \$700 (1000 - 300) o sea \$245 (700 x 0.35), mientras que la empresa B pagará \$350 (1000 x 0.35), y esto trae consigo una mayor utilidad después de impuestos para B (\$650 = \$1,000-\$350) y una más baja para A (\$455 = \$1,000 - \$300 - \$245).

Entonces, ¿cómo es que A es beneficiado?. El punto clave está en que, la empresa B para financiarse debe captar más capital de accionistas, y para esto expidió un número mayor de acciones que se adicionaron a las ya existentes. Si crece el número de acciones, la utilidad generada se dividirá entre un número mayor de acciones, trayendo consigo una menor utilidad por acción. En cambio, la empresa A aparentemente generó menos utilidades, pero tiene las mismas acciones para repartir esas utilidades y por ende tendrá un monto mayor de utilidades por acción.

Cabe destacar, que en el apalancamiento, existe un efecto contrario: si no se generan los ingresos necesarios para rebasar su punto de equilibrio (donde no se pierde ni se gana) se tendrían pérdidas extraordinarias por el cargo fijo de gastos e intereses.

Debido a lo anterior, para nuestro análisis se optó por utilizar el apalancamiento financiero obteniendo un préstamo del 30% ósea M\$ 42.34 del total de las inversiones, con una tasa de interés del 10% anual a diez años como se muestra en la tabla 5.25.

Tabla 5.25 Apalancamiento financiero con tasa de interés del 10% anual.

AÑO	Pago Principal Tasa = 10%	Saldo Préstamo	Pago Interés	Total Pagos Financieros
2001	0.00	42.34	0.00	0.00
2002	4.23	38.10	4.23	8.47
2003	4.23	33.87	3.81	8.04
2004	4.23	29.64	3.39	7.62
2005	4.23	25.40	2.96	7.20
2006	4.23	21.17	2.54	6.77
2007	4.23	16.93	2.12	6.35
2008	4.23	12.70	1.69	5.93
2009	4.23	8.47	1.27	5.50
2010	4.23	4.23	0.85	5.08
2011	4.23	0.00	0.42	4.66

Fuente propia

Se consideró un ISR del 30%, por lo que el flujo de caja neto se muestra a continuación:

Tabla 5.26 Flujo de caja del ejercicio del proyecto.

Año	Utilidad Después de Intereses Antes ISR (M\$)	ISR 30% (M\$)	Utilidad neta (M\$)	Flujo de caja <sup>23</sup> (M\$)
2001	0	0	0	-98.79
2002	24.13	7.24	16.89	21.68
2003	23.46	7.04	16.42	21.21
2004	22.91	6.87	16.03	20.82
2005	22.41	6.72	15.69	20.47
2006	19.18	5.76	13.43	18.22
2007	19.45	5.83	13.61	18.40
2008	17.26	5.18	12.08	16.87
2009	15.80	4.74	11.06	15.85
2010	15.97	4.79	11.18	15.97
2011	1.94	0.58	1.36	6.15
2012	12.20	3.66	8.54	8.56
2013	11.25	3.38	7.88	7.90
2014	10.09	3.03	7.06	7.08
2015	9.17	2.75	6.42	6.44
2016	7.74	2.32	5.42	5.44
2017	7.86	2.36	5.50	5.52
2018	7.17	2.15	5.02	5.04
2019	6.37	1.91	4.46	4.48
2020	5.60	1.68	3.92	3.94
2021	5.05	1.52	3.54	3.56

Finalmente, los valores del valor presente neto (VPN) y tasa interna de retorno (TIR) del proyecto son:

$$\text{VPN} = \text{M\$ } 0.00$$

$$\text{TIR} = 16.0\%$$

## 5.5 Recapitulación de Supuestos de Análisis.

### 5.5.1 Tasa de Descuento.

La tasa de descuento en un proyecto es el costo medio ponderado de las fuentes de financiamiento (weighted average costo of capital, WACC), donde los ponderadores son la proporción de cada fuente en el monto total de la inversión.

El costo de capital propio (R) puede estimarse mediante el Capital Asset Pricing Model (CAPM). Este modelo indica que el rendimiento requerido es igual a la tasa que

<sup>23</sup> El flujo de caja es la suma de la utilidad neta más la depreciación.

puede ganarse sin incurrir en ningún riesgo (tasa de bonos gubernamentales), más un premio por el nivel de riesgo del proyecto. El premio por riesgo se establece como el rendimiento que el mercado de valores tiene por encima de la tasa libre de riesgo, multiplicado por un multiplicador del riesgo específico del activo o proyecto de interés ( $\beta$ ). Algebraicamente:

$$R_i = R_F + \beta_i (R_M - R_F)$$

donde:

- R = tasa de rendimiento requerido para el activo o proyecto i
- R<sub>F</sub> = tasa libre de riesgo
- R<sub>M</sub> = tasa de rendimiento del mercado total de valores
- $\beta$  = indicador de riesgo específico del activo o proyecto i

El parámetro  $\beta$  puede ser mayor, menor o igual a 1. Si  $\beta$  es mayor que 1, significa que el riesgo específico, no diversificable, del proyecto es superior al que tiene el mercado de valores en su conjunto. Como la ecuación anterior es lineal,  $\beta$  representa el coeficiente de pendiente y puede ser calculado mediante análisis de regresión.

Como se puede observar, el cálculo de la tasa de descuento resulta ser hasta cierto punto complicado, debido a la naturaleza de sus variables, por lo que se procedió por simplicidad tomar el valor de tasa de descuento de 16%, ya que se considera que es un porcentaje razonable para este tipo de proyectos.

### 5.5.2 Mercado Estimado de RCE's.

Para este análisis financiero, se supuso que el precio base por cada tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente es de US\$ 5.36 en ausencia de cifras confiables y dado que con este nivel se obtiene un Valor Presente Neto prácticamente igual a cero. Actualmente no hay un precio definido en el comercio de emisiones, aunque se estima que con la ratificación del Protocolo de Kyoto por parte de Rusia, los precios actuales que oscilan alrededor de US\$ 4.00 alcancen precios desde US\$ 6.00 hasta US\$ 18.00<sup>24</sup> por cada tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente certificada. En el tema 5.6 se llevará a cabo un análisis de sensibilidad con otros valores de precios de RCE's.

### 5.5.3 Tarifa de Energía Eléctrica.

Se supuso que la energía generada en este proyecto, sería vendida a CFE a una tarifa de alta tensión (HT), a un precio estimado de \$ 690.00 por MWh con base a las tarifas proporcionadas en su página oficial, registradas durante el año en curso.

### 5.5.4 Tasa de Interés.

La tasa de interés que se utilizó para calcular el Valor Futuro de las inversiones efectuadas durante los años 1991 a 2002, fue del 16%, ya que se consideró un valor típico para inversiones en proyectos de esta naturaleza.

<sup>24</sup> Fuente: Revista Energía a Debate. Ed. Mundi Comunicaciones. Año No. 2, Volumen II, No.8, Abril-Mayo de 2005. México D.F. Página 30.



### 5.5.5 Tipo de cambio.

Ya que las fuentes de información consultadas para esta investigación, tomaban valores en dólares americanos (US\$), fue necesario utilizar un tipo de cambio para estimar costos en pesos mexicanos. Dicho tipo de cambio se consideró de \$11.00 por cada dólar americano.

### 5.5.6 Impuesto sobre la renta (ISR).

El ISR que se usó para evaluar la rentabilidad del proyecto fue del 30.0 % por ser un valor parecido al actual y que puede modificarse en el futuro según las disposiciones oficiales que se adopten.

### 5.5.7 Factor de emisión.

El factor se consideró de 0.584 tCO<sub>2</sub> por cada MWh de energía eléctrica generada. Este valor fue tomado de la Guía para la Implementación de los Mecanismos Flexibles de Kyoto y MDL en Latinoamérica y el Caribe.

## 5.6 Rango de variables clave.

### ➤ Tarifa eléctrica.

Para este trabajo de tesis la tarifa base es de \$0.69/kWh (como se explicó en la sección 5.3.1), con un rango de 10% relativo arriba de ésta, así como 10% relativo debajo de la misma, es decir, \$0.759/kWh y \$0.621/kWh respectivamente.

### ➤ Apalancamiento.

Se consideró un apalancamiento base de 30% del costo de la inversión total del proyecto. El rango para esta variable clave fue de ±10% absoluto, resultando un apalancamiento del 40% y 20%.

### ➤ Tasa de descuento.

La tasa de descuento para el caso base es de 16%. Para esta variable se aplicó un rango absoluto del ±2%, o sea, 18% y 14%.

### ➤ Inversión.

En el caso de la inversión es de M\$140.24 (como se calculó en la sección 5.1), con un rango de 10% relativo arriba de ésta, así como 10% relativo debajo de la misma, es decir, M\$154.22 y M\$126.18 respectivamente.

### ➤ Precio de las RCE's.

En este caso se tomó un rango de US\$0.00, a US\$10.00 por tCO<sub>2</sub>e. El caso base de esta variable clave es de US\$5.36/tCO<sub>2</sub>e.

### 5.7 Análisis de sensibilidad.

Para el análisis de sensibilidad, se procedió a graficar el comportamiento del proyecto tomando como variables significativas para este estudio al VPN y TIR contra la variación del precio de RCE's, de acuerdo al rango acordado. Dicho precio será considerado como la variable primaria o la variable más importante para el estudio ya que es la que da pauta a que el proyecto sea o no rentable. Las graficas presentadas a continuación se realizaron con respecto a las cuatro variables secundarias, es decir, tarifa de energía eléctrica, apalancamiento, tasa de descuento y la inversión, tomando en cuenta los rangos descritos presentados en la sección anterior.

Figura 5.1 Gráfica de Tarifa de Energía Eléctrica VPN.

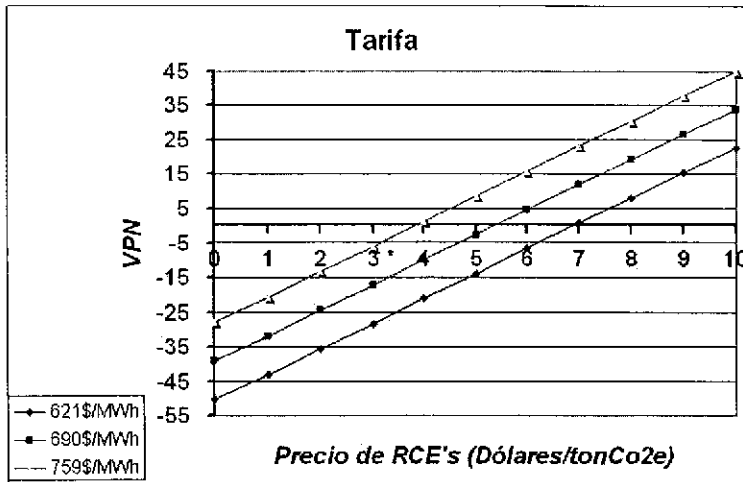


Figura 5.2 Gráfica de Tarifa de Energía Eléctrica TIR.

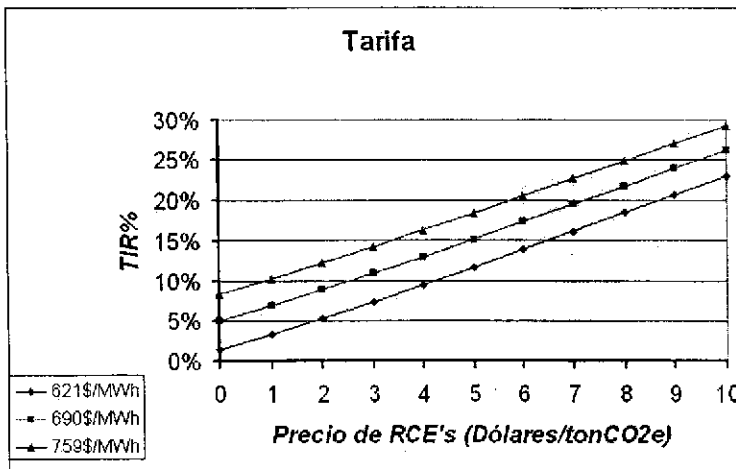


Figura 5.3 Gráfica de Apalancamiento VPN.

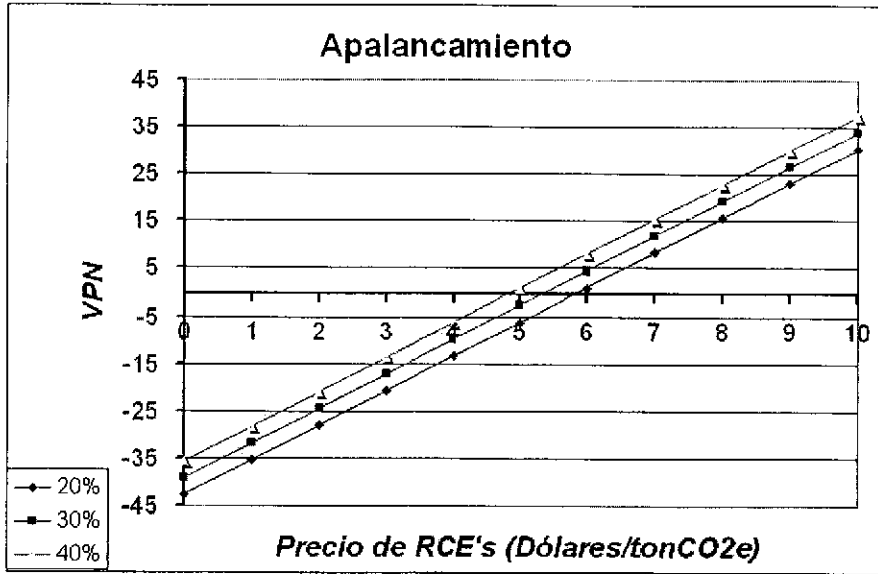


Figura 5.4 Gráfica de Apalancamiento TIR.

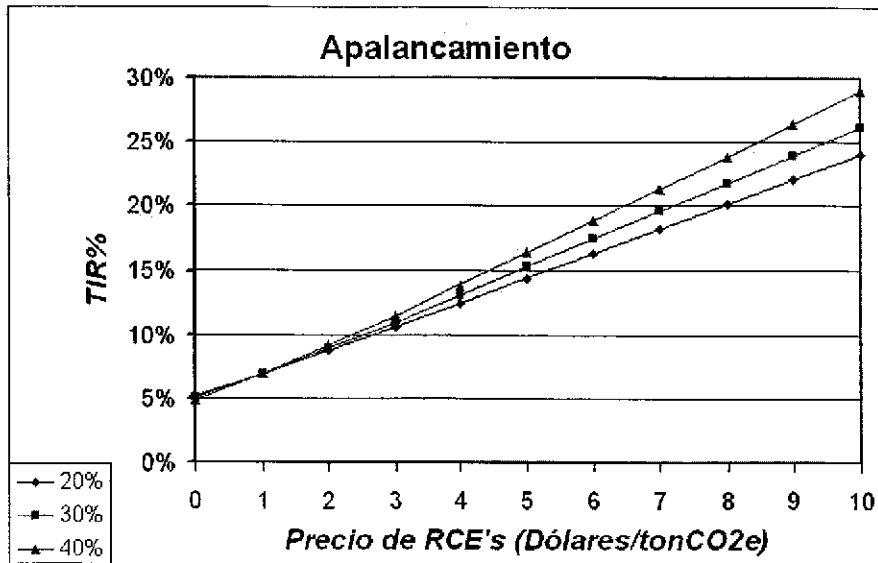


Figura 5.5 Gráfica de Tasa de Descuento VPN.

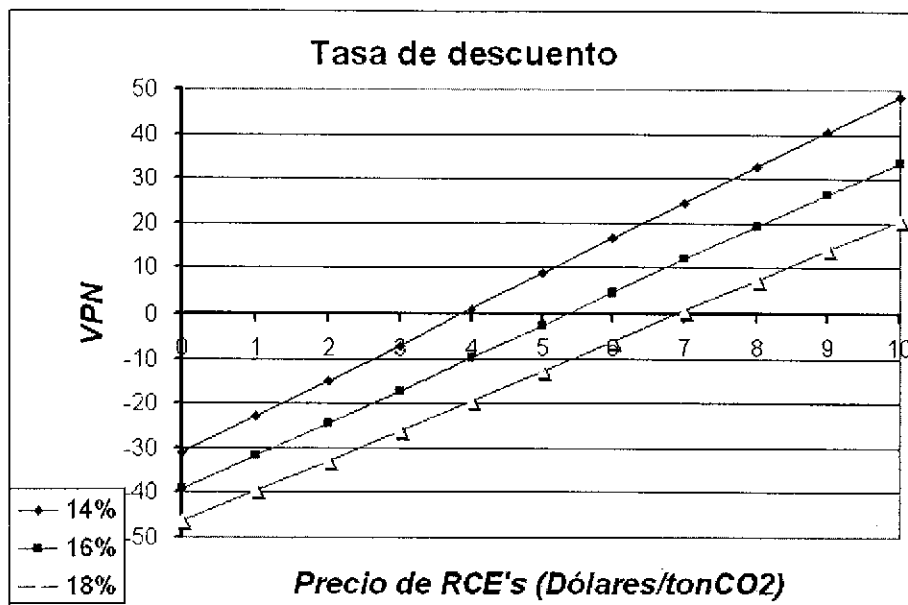


Figura 5.6 Gráfica de Tasa de Descuento TIR.

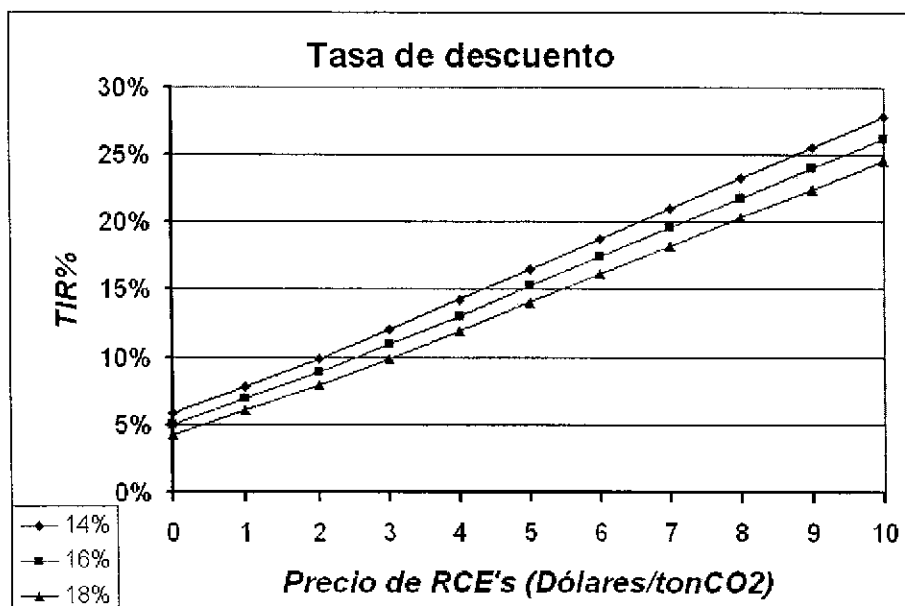


Figura 5.7 Gráfica de Inversión VPN.

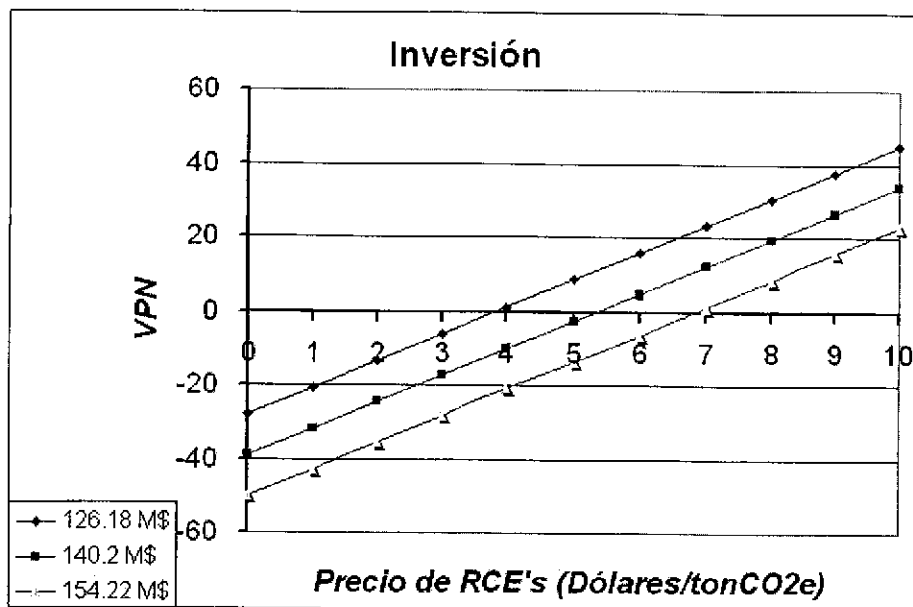
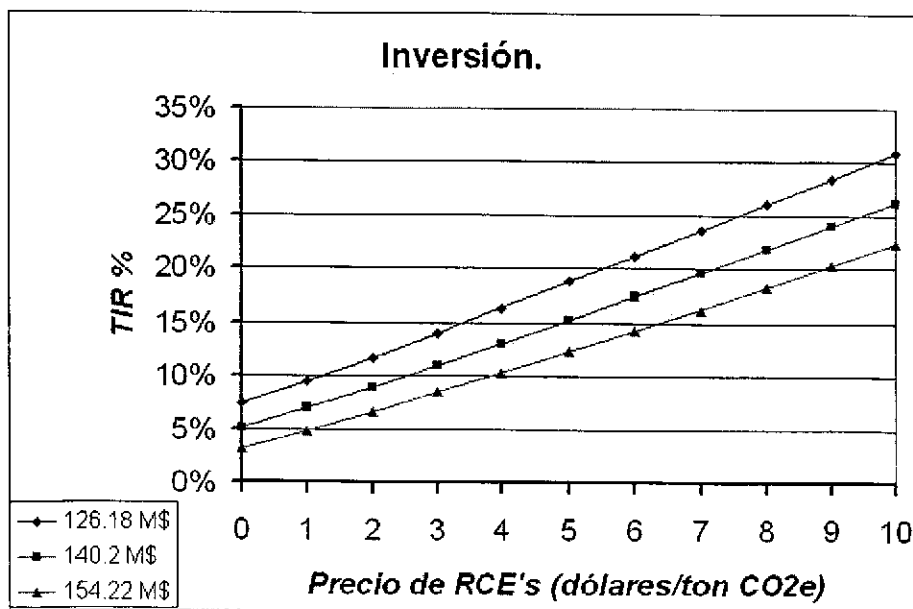


Figura 5.8 Gráfica de Inversión TIR.



Analizando las graficas se puede ver que el comportamiento fue el esperado ya que:

1. A tarifas de energía eléctrica más altas hay mayor rentabilidad.
2. A apalancamiento más alto se presenta mayor rentabilidad.
3. A tasas de descuentos más altas existe menor rentabilidad.
4. A inversión más alta hay menor rentabilidad.

Tabla 5.27 Precio de RCE's para caso base y rangos adoptados.

Variable	Valor	Precio
Tarifa de energía eléctrica (\$/MWh)	621	6.89
	690*	5.36*
	759	3.83
Apalancamiento (%)	20	5.85
	30*	5.36*
	40	4.88
Tasa de descuento (%)	14	3.9
	16*	5.36*
	18	6.91
Inversión (M\$)	126.18	3.84
	140.24*	5.36*
	154.22	6.87

Fuente Propia. \*Caso base



## CAPÍTULO 6

## CONCLUSIONES

A partir de un precio de US\$ 5.36/tonCO<sub>2</sub> equivalente, y con los parámetros base mencionados, los proyectos de generación de energía eléctrica con base a gas de relleno sanitario son rentables. Asimismo, dichos proyectos son más rentables a mayor tarifa de energía eléctrica, a mayor apalancamiento, a menor tasa de descuento y a menor inversión. Sin embargo, para proyectos del tamaño descrito y con los parámetros adoptados, de no existir el beneficio de monetizar las reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero que permite el Mecanismo de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kyoto, este tipo de proyectos no se emprenderían.





ANEXOS

---

## Anexo A: Países Incluidos en el Anexo I, Anexo II y No Anexo I.

La convención divide a los países en tres grupos de acuerdo a sus compromisos:

### Anexo I

Partes que incluyen a los países industrializados que fueron miembros de la Organización para la Cooperación Económica y Desarrollo (OECD) en 1992, además de los países con economías en transición, incluyendo las Federación Rusa, los Estados Bálticos y muchos Estados del Centro y Este de Europa.

### Anexo II

Partes que son miembros de la OECD del Anexo I, pero que no son economías en transición. Son requeridos para proveer recursos financieros para permitir a los países en desarrollo emprender actividades para la reducción de emisiones bajo la Convención y para ayudarlos a adaptar los efectos adversos de el cambio climático. En resumen, tienen que tomar todos los "pasos prácticos" para promover el desarrollo y transferencia de tecnologías ambientalmente amigables para las economías en transición y países en desarrollo. La provisión de fondos del Anexo II son canalizados en su mayoría por el mecanismo financiero de la Convención.

### No Anexo I

Partes que son en su mayoría países en desarrollo. Ciertos grupos de países en desarrollo son reconocidos por la Convención como especialmente vulnerables a los impactos adversos del cambio climático, con pocas áreas costeras y propensas a sequías. Otros (como los que basan sus ingresos en la producción y comercio de combustibles fósiles) son más vulnerables a impactos económicos potenciales para tomar medidas para responder al cambio climático. La Convención enfatiza actividades que prometen una respuesta a esas necesidades especiales y que concierne a estos países vulnerables, como inversión y transferencia de tecnología.

A continuación se presentan las listas de países que conforman los Anexo I y No Anexo I:

**Lista de las Partes del Anexo I.**

Alemania	Irlanda
Australia	Islandia
Austria	Italia
Belarusia	Japón
Bélgica	Latvia
Bulgaria	Liechtenstein
Canadá	Lituania
Comunidad Económica Europea	Luxemburgo
Croacia	Mónaco
Dinamarca	Noruega
Eslovaquia	Nueva Zelanda
Eslovenia	Polonia
España	Portugal
Estados Unidos de América	Reino Unido de la Gran Bretaña y Norte de Irlanda
Estonia	República Checa
Federación Rusa	Rumania
Finlandia	Suecia
Francia	Suiza
Grecia	Turquía
Holanda	Ucrania
Hungría	

Fuente: UNFCCC

## Partes No Anexo I

Afganistán	Granada	Pakistán
Albania	Guatemala	Palau
Angola	Guinea	Panamá
Arabia Saudita	Guinea Ecuatorial	Papua Nueva Guinea
Argelia	Guinea Bissau	Paraguay
Antigua y Barbuda	Guyana	Perú
Argentina	Haití	Qatar
Armenia	Honduras	Rwanda
Azerbaijón	India	República Central Africana
Bahamas	Indonesia	República de Corea
Bahrein	Irán (República Islámica de)	República Democrática de Laos
Bangla Desh	Irak	República Democrática de Corea
Barbados	Islas Cook	República Dominicana
Belice	Islas Marshall	República de Moldova
Benin	Islas Salomón	Republica Unida de Tanzania
Bhután	Israel	Santa Lucía
Bolivia	Jamaica	San Vicente y Granadinas
Bosnia y Herzegovina	Jordania	Samoa
Botswana	Kazajstán	San Marino
Brasil	Kenya	Santo Tomé y Príncipe
Burkina Faso	Kiribati	San Kitts y Nevis
Burundi	Kuwait	Senegal
Camboya	Kyrgyzstán	Serbia y Montenegro
Camerún	Lesotho	Seychelles
Cape Verde	Libano	Sierra Leone
Chad	Liberia	Singapur
Chile	Libia	Sudáfrica
China	Macedonia (ex República de Yugoslavia)	Siria
Chipre	Madagascar	Sri Lanka
Colombia	Malawi	Sudan
Comores	Malasia	Surinam
Congo	Maldivas	Suazilandia
Costa Rica	Malí	Tailandia
Côte d'Ivoire	Mauritania	Tanzania
Cuba	Mauritania	Tuvalu
Dominica	México	Togo
Ecuador	Micronesia (Estados Federales de)	Tonga
Egipto	Mongolia	Trinidad y Tobago
El Salvador	Marruecos	Túnez
Emiratos Árabes Unidos	Mozambique	Turkmenistán
Eritrea	Myanmar	Uruguay
Etiopía	Namibia	Uzbekistán
Fiji	Nauru	Vanuatu
Filipinas	Nepal	Vietnam
Gabón	Nicaragua	Yemen
Gambia	Nigeria	Zambia
Georgia	Niue	Zimbabwe
Ghana	Omán	

Fuente: UNFCCC

Anexo B: Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1996.

**NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-083-ECOL-1996**

**SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE,  
RECURSOS NATURALES Y PESCA**

**NORMA OFICIAL MEXICANA  
NOM-083-ECOL-1996**

**QUE ESTABLECE LAS CONDICIONES QUE DEBEN REUNIR LOS SITIOS  
DESTINADOS A LA DISPOSICION FINAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES**

**JULIA CARABIAS LILLO**, Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, con fundamento en los artículos 32 Bis fracciones I, II, IV y V de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal; 5o. fracciones I y VIII, 6o. fracción XIII y último párrafo, 36, 37, 137, 160 y 171 de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; 38 fracción II, 40 fracción X, 41, 43, 44, 45, 46 y 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; y

### CONSIDERANDO

Que en cumplimiento a lo dispuesto en la fracción I del artículo 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, el 22 de junio de 1994 se publicó en el Diario Oficial de la Federación con carácter de Proyecto la presente Norma Oficial Mexicana bajo la denominación de NOM-083-ECOL-1994, que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a relleno sanitario para la disposición final de los residuos sólidos municipales, a fin de que los interesados en un plazo de 90 días naturales presentaran sus comentarios al Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental, sito en Río Elba No. 20, Colonia Cuauhtémoc código postal 06500, México, D.F.

Que durante el plazo a que se refiere el considerando anterior, de conformidad con lo dispuesto en el artículo 45 del ordenamiento legal citado en el párrafo anterior, estuvieron a disposición del público los documentos a que se refiere dicho precepto.

Que de acuerdo con lo que disponen las fracciones II y III del artículo 47 de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, los comentarios presentados por los interesados fueron analizados en el seno del citado Comité, realizándose las modificaciones procedentes, entre las cuales y para mayor entendimiento se encuentra el título de la presente Norma y publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** de fecha 1o. de diciembre de 1995 las respuestas a los comentarios recibidos en el plazo de Ley, así como la aclaración correspondiente a las mismas el 30 de mayo de 1996 en el referido Órgano Informativo.

Que habiéndose cumplido el procedimiento establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización para la elaboración de Normas Oficiales Mexicanas, el Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental, en sesión de fecha 12 de junio de 1995, aprobó la presente Norma Oficial Mexicana bajo la denominación de NOM-083-ECOL-1996, que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales; por lo que he tenido a bien expedir la siguiente

**NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-083-ECOL-1996, QUE ESTABLECE LAS CONDICIONES QUE DEBEN REUNIR LOS SITIOS DESTINADOS A LA DISPOSICION FINAL DE LOS RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES.**

## INDICE

0. Introducción
1. Objetivo y campo de aplicación
2. Definiciones
3. Especificaciones
4. Procedimientos
5. Grado de concordancia con normas y recomendaciones internacionales
6. Bibliografía
7. Observancia de esta norma

### 0. INTRODUCCION

0.1 Los sitios de disposición final de residuos sólidos municipales generan lixiviados que contienen diversos contaminantes que pueden afectar los recursos naturales en especial los acuíferos y los cuerpos superficiales de agua. La aplicación de esta norma permitirá proteger el ambiente, preservar el equilibrio ecológico y minimizar los efectos contaminantes.

### 1. OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACION

1.1 Esta Norma Oficial Mexicana establece las condiciones de ubicación, hidrológicas, geológicas e hidrogeológicas que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales, y es de observancia obligatoria para aquellos que tienen la responsabilidad de la disposición final de los residuos sólidos municipales.

### 2. DEFINICIONES

#### 2.1 Acuífero

Es cualquier formación geológica por la que circulan o se almacenan aguas subterráneas, que puedan ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento.

#### 2.2 Acuífero confinado

Es aquel acuífero que está limitado en su parte superior por una unidad de baja conductividad hidráulica y el nivel piezométrico presenta una presión superior a la atmosférica.

#### 2.3 Acuífero libre

Es un acuífero en el cual el nivel freático o nivel de saturación se encuentra a la presión atmosférica.

#### 2.4 Acuífero semiconfinado.

Aquel acuífero que tiene una unidad saturada de baja conductividad hidráulica en su parte superior o inferior que contribuye con un pequeño caudal (goteo) debido a los gradientes inducidos por bombeo del acuífero.

## **2.5 Acuitardo**

Es cualquier formación geológica por la que circula muy lentamente agua subterránea, por lo que generalmente no son utilizados para su explotación, uso o aprovechamiento.

## **2.6 Agua subterránea**

Es el agua que se encuentra en el subsuelo, en formaciones geológicas parcial o totalmente saturadas.

## **2.7 Áreas naturales protegidas.**

Las zonas del territorio nacional y aquellas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción, en que los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del hombre, y que han quedado sujetas al régimen de protección.

## **2.8 Capacidad de intercambio catiónico.**

Es el total de cationes intercambiables que puede absorber un suelo, expresado en miliequivalentes de los cationes por cada 100 g (cien gramos) de masa de suelo seco.

## **2.9 Carga hidráulica.**

Es la energía presente en un acuífero, normalmente tiene dos componentes:

a) la carga relacionada con la elevación con respecto a un punto de referencia que es normalmente el nivel medio del mar; y b) la carga de presión, o presión de poro.

## **2.10 Conductividad hidráulica.**

Es la propiedad de un medio geológico de permitir el flujo de agua subterránea en un acuífero o acuitardo, considerando las condiciones de densidad y viscosidad del agua.

## **2.11 Contaminantes no reactivos**

Son los contaminantes que viajan en solución, a la misma velocidad lineal que el agua subterránea. No sufren reacciones químicas ni biológicas con el medio granular.

## **2.12 Descripción estratigráfica**

Es la descripción de los estratos del subsuelo en cuanto a sus propiedades físicas, químicas e hidráulicas, de acuerdo al código de nomenclatura estratigráfica vigente.

## **2.13 Discontinuidades**

Superficie marcada por modificaciones radicales de las propiedades físicas de las rocas. Estas discontinuidades pueden ser por ejemplo, fallas o fracturas.

## **2.14 Disposición final**

La acción de depositar permanentemente los residuos en sitios y condiciones adecuados para evitar daños al ambiente.



---

### **2.15 Falla**

Es cuando se producen desplazamientos relativos de una parte de la roca con respecto a la otra, como resultado de los esfuerzos que se generan en la corteza terrestre.

### **2.16 Falla activa**

Son aquellas fallas que han sufrido desplazamiento durante el Holoceno (último millón de años).

### **2.17 Fracción de carbono orgánico**

La fracción de carbono orgánico se refiere al porcentaje de carbono orgánico en el suelo, derivado de restos de plantas. Es importante en la retención de contaminantes orgánicos.

### **2.18 Fractura**

Es una discontinuidad en las rocas producida por un sistema de esfuerzos.

### **2.19 Freatofitas**

Son plantas que extienden sus raíces por debajo del nivel freático y extraen sus requerimientos de humedad directamente de la zona saturada.

### **2.20 Geofísica**

La ciencia que estudia las propiedades físicas de la tierra y el conocimiento de la estructura geológica de los materiales que la constituyen.

### **2.21 Geología**

Es el estudio de la formación, evolución, distribución, correlación y comparación de los materiales terrestres.

### **2.22 Hidrogeología**

Es el conjunto de actividades tales como perforaciones, determinación de la recarga, profundidades a nivel estático, interacción química agua-roca y propiedades hidráulicas que permiten conocer y localizar los sistemas de aguas subterráneas, su dirección y velocidad de movimiento.

### **2.23 Hidrología**

La ciencia que estudia los componentes primarios del ciclo hidrológico y su relación entre sí. Considera la interacción y dinámica de la atmósfera con cuerpos de agua superficial tales como ríos, arroyos, lagunas, lagos, etc.

### **2.24 Infiltración**

Introducción suave de un líquido entre los poros de un sólido referido al agua, el paso lento de ésta a través de los intersticios del suelo y del subsuelo.

### **2.25 Lixiviado**

Líquido proveniente de los residuos, el cual se forma por reacción, arrastre o percolación y que contiene, disueltos o en suspensión, componentes que se encuentran en los mismos residuos.

### **2.26 Nivel freático**

La superficie de agua que se encuentra en el subsuelo bajo el efecto de la fuerza de gravitación y que delimita la zona de aireación de la de saturación.

### **2.27 Nivel piezométrico**

Es el valor de la carga hidráulica observado de un acuífero o acuitardo a diferente profundidad en el mismo y en el medio saturado.

### **2.28 Parámetros hidráulicos**

Son la conductividad hidráulica, la porosidad, la carga hidráulica, los gradientes hidráulicos de una unidad hidrológica, así como su coeficiente de almacenamiento.

### **2.29 Percolación**

Es el movimiento descendente de agua a través del perfil del suelo debido a la influencia de la gravedad.

### **2.30 Permeabilidad**

La propiedad que tiene una sección unitaria de terreno para permitir el paso de un fluido a través de ella sin deformar su estructura bajo la carga producida por un gradiente hidráulico.

### **2.31 Porosidad efectiva**

Es la relación del volumen de vacíos o poros interconectados de una roca o suelo dividido por el volumen total de la muestra.

### **2.32 Potencial de contaminación**

Es la interacción entre el tipo, intensidad, disposición y duración de la carga contaminante con la vulnerabilidad del acuífero; está definida por las condiciones de flujo del agua subterránea y las características físicas y químicas del acuífero.

### **2.33 Residuo sólido municipal**

El residuo sólido que proviene de actividades que se desarrollan en casa-habitación, sitios y servicios públicos, demoliciones, construcciones establecimientos comerciales y de servicios, así como residuos industriales que no se deriven de su proceso.

### **2.34 Sistema de flujo**

Es definido por la dirección de flujo que sigue el agua subterránea, considerando las zonas de recarga y descarga, las cargas y gradientes hidráulicos a profundidad y el efecto de fronteras hidráulicas. Incluye además la interacción con el agua superficial y comprende sistemas locales, intermedios y regionales.

### **2.35 Talud**

Es la inclinación formada por la acumulación de fragmentos del suelo con un ángulo de reposo del material del terreno de que se trate.

### **2.36 Unidades litológicas**

Conjunto de materiales geológicos compuestos predominantemente de cierta asociación de minerales que tienen un origen común.

### **2.37 Volumen de extracción**

Se refiere a la cantidad de agua subterránea que se extrae de un acuífero a través de pozos o norias.

### **2.38 Zona de aireación**

La zona que contiene agua bajo presión menor a la de la atmósfera, está delimitada entre la superficie del terreno y el nivel freático.

### **2.39 Zona de descarga**

Es la porción del drenaje subterráneo de la cuenca en la cual el flujo de agua subterránea fluye de mayor profundidad hacia el nivel freático; es decir el flujo subterráneo es ascendente.

### **2.40 Zona de inundación**

Área sujeta a variaciones de nivel de agua por arriba del nivel del terreno asociadas con la precipitación pluvial, el escurrimiento y las descargas de agua subterránea.

### **2.41 Zona de recarga**

Es la porción del drenaje subterráneo de la cuenca en la cual el flujo del agua subterránea fluye del nivel freático hacia mayor profundidad; es decir el flujo subterráneo es descendente.

### **2.42 Zona de saturación**

El área que se caracteriza por tener sus poros o fracturas llenas de agua, su límite superior corresponde al nivel freático y su límite inferior es una unidad impermeable.

## **2.43 Zona no saturada**

Es el espesor que existe entre la superficie del terreno y el nivel freático. Es equivalente a la profundidad del nivel freático.

## **3. ESPECIFICACIONES**

**3.1** Con el fin de cumplir con las diferentes especificaciones de ubicación que debe satisfacer un sitio para la disposición final de residuos sólidos municipales y facilitar la toma de decisiones en las diferentes etapas de los estudios que se describen en el punto 4 de esta Norma Oficial Mexicana, debe ser considerado el diagrama de flujo que se describe en el Anexo 1.

**3.2** Las condiciones mínimas que debe cumplir un sitio de disposición final de residuos sólidos municipales son las siguientes:

### **3.2.1 Aspectos generales**

**3.2.1.1** Restricción por afectación a obras civiles o áreas naturales protegidas.

**3.2.1.1.1** Las distancias mínimas a aeropuertos son:

a) De 3000 m (tres mil metros) cuando maniobren aviones de motor a turbina.

b) De 1500 m (mil quinientos metros) cuando maniobren aviones de motor a pistón.

**3.2.1.1.2** Respetar el derecho de vía de autopistas, ferrocarriles, caminos principales y caminos secundarios.

**3.2.1.1.3** No se deben ubicar sitios dentro de áreas naturales protegidas.

**3.2.1.1.4** Se deben respetar los derechos de vía de obras públicas federales, tales como oleoductos, gasoductos, poliductos, torres de energía eléctrica, acueductos, etc.

**3.2.1.1.5** Debe estar alejado a una distancia mínima de 1500 m (mil quinientos metros), a partir del límite de la traza urbana de la población por servir, así como de poblaciones rurales de hasta 2500 habitantes. En caso de no cumplirse con esta restricción, se debe demostrar que no existirá afectación alguna a dichos centros de población.

**3.2.1.2** La localización de sitios de disposición final de residuos sólidos municipales, para aquellas localidades con una población de hasta 50,000 habitantes, o cuya recepción sea de 30 toneladas por día, de estos residuos; se debe hacer considerando exclusivamente las especificaciones establecidas en los puntos 3.2.3 y 3.2.4 de esta Norma Oficial Mexicana.

### **3.2.2 Aspectos hidrológicos**

**3.2.2.1** Se debe localizar fuera de zonas de inundación con periodos de retorno de 100 años. En caso de no cumplir lo anterior se debe demostrar que no exista la obstrucción del flujo en el área de inundación o posibilidad de deslaves o erosión que provoquen arrastre de los residuos sólidos.

**3.2.2.2** El sitio de disposición final de residuos sólidos municipales no se debe ubicar en zonas de pantanos, marismas y similares.

**3.2.2.3** La distancia de ubicación del sitio, con respecto a cuerpos de agua superficiales con caudal continuo, debe ser de 1000 m (mil metros) como mínimo y contar con una zona de amortiguamiento tal que pueda retener el caudal de la precipitación pluvial máxima presentada en los últimos 10 años en la cuenca, definida por los canales perimetrales de la zona.

### **3.2.3 Aspectos geológicos**

**3.2.3.1** Debe estar a una distancia mínima de 60 m (sesenta metros) de una falla activa que incluya desplazamiento en un período de tiempo de un millón de años.

**3.2.3.2** Se debe localizar fuera de zonas donde los taludes sean inestables, es decir que puedan producir movimientos de suelo o roca, por procesos estáticos y dinámicos.

**3.2.3.3** Se deben evitar zonas donde existan o se puedan generar asentamientos diferenciales que lleven a fallas o fracturas del terreno, que incrementen el riesgo de contaminación al acuífero.

### **3.2.4 Aspectos hidrogeológicos**

**3.2.4.1** En caso de que el sitio para la disposición final de los residuos sólidos municipales esté sobre materiales fracturados, se debe garantizar que no exista conexión con los acuíferos de forma natural y que el factor de tránsito de la infiltración ( $f$ ) sea  $\leq 3 \times 10^{-10} \text{ seg}^{-1}$ .

**3.2.4.2** En caso de que el sitio para la disposición final de los residuos sólidos municipales esté sobre materiales granulares, se debe garantizar que el factor de tránsito de la infiltración ( $f$ ) sea  $\leq 3 \times 10^{-10} \text{ seg}^{-1}$ .

**3.2.4.3** La distancia mínima del sitio a pozos para extracción de agua para uso doméstico, industrial, riego y ganadero tanto en operación como abandonados, debe estar a una distancia de la proyección horizontal por lo menos de 100 m (cien metros) de la mayor circunferencia del cono de abatimiento, siempre que la distancia resultante sea menor a 500 m (quinientos metros), esta última será la distancia a respetar.

### **3.2.5 Consideraciones de selección**

**3.2.5.1** En caso de que exista una probable contaminación a cuerpos de agua superficial y subterránea, se debe recurrir a soluciones mediante obras de ingeniería.

## **4. PROCEDIMIENTOS**

**4.1** La selección de un sitio para la disposición final de residuos sólidos municipales requiere de estudios geológicos, hidrogeológicos y otros complementarios.

## **4.2 Estudios geológicos**

**4.2.1** Se deben realizar estudios geológicos de tipo regional y local de acuerdo con las siguientes características:

### **4.2.1.1 Estudio geológico regional**

Determinar el marco geológico regional con el fin de obtener su descripción estratigráfica, así como su geometría y distribución, considerando también la identificación de discontinuidades, tales como fallas y fracturas. Asimismo se debe incluir todo tipo de información existente que ayude a un mejor conocimiento de las condiciones del sitio; esta información puede ser de cortes litológicos de pozos de agua, exploración geotécnica, petrolera, o de otra índole.

### **4.2.1.2 Estudio geológico local**

Determinar las unidades litológicas en el sitio, su geometría, distribución y presencia de fallas y fracturas. Asimismo debe incluir estudios geofísicos para complementar la información sobre las unidades litológicas. El tipo de método a utilizar y el volumen de trabajo, debe garantizar el conocimiento tridimensional del comportamiento y distribución de los materiales en el subsuelo hasta una profundidad y distribución horizontal adecuada a las características geológicas e hidrogeológicas del área en que se ubica el sitio.

**4.2.1.3** Si los resultados geológicos y geofísicos preliminares muestran que no existe conexión aparente entre las rocas fracturadas con acuíferos o que la distribución de unidades litológicas de baja permeabilidad es amplia, se debe realizar un mínimo de una perforación en la periferia del sitio.

## **4.3 Estudios hidrogeológicos**

**4.3.1** Los estudios hidrogeológicos deben considerar cinco etapas:

Evidencias y uso del agua subterránea.

Identificación del tipo de acuífero.

Determinación de parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas, características físico-químicas del agua subterránea y características elementales de los estratos del subsuelo.

Análisis del sistema de flujo.

Evaluación del potencial de contaminación.

### **4.3.1.1 Evidencias y uso del agua subterránea**

Definir la ubicación y distribución de todas las evidencias del agua subterránea, tales como manantiales, pozos y norias, a escala regional y local. Asimismo se debe determinar el volumen de extracción, tendencias de la explotación y planes de desarrollo en la zona de estudio.

#### 4.3.1.2 Identificación del tipo de acuífero

Identificar las unidades hidrogeológicas, extensión y geometría, tipo de acuífero (libre, confinado, semi-confinado) y relación entre las diferentes unidades hidrogeológicas que definen el sistema acuífero.

#### 4.3.1.3 Determinación de parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas, características físico-químicas del agua subterránea y características elementales de los estratos del subsuelo

Determinar la profundidad al nivel piezométrico en el sistema acuífero, dirección y velocidad del agua subterránea a partir de los parámetros de conductividad hidráulica, carga hidráulica y porosidad efectiva.

Conocer la composición química del agua subterránea.

Determinar la conductividad hidráulica (K), la fracción de carbono orgánico (FCO) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los diferentes estratos del subsuelo de la zona no saturada.

#### 4.3.1.4 Análisis del sistema de flujo

Con base en la información geológica y de los puntos 4.3.1.1, 4.3.1.2 y 4.3.1.3 de esta Norma Oficial Mexicana y de otros elementos hidrogeológicos, tales como zonas de freatofitas, zonas de recarga y descarga, etc., se debe definir el sistema de flujo local y regional del área de estudio.

#### 4.3.1.5 Evaluación del potencial de contaminación

Se debe integrar toda la información obtenida de los puntos 4.3.1.1, 4.3.1.2, 4.3.1.3 y 4.3.1.4 de esta Norma Oficial Mexicana, para determinar si el sitio es apto o si requiere obras de ingeniería. Para ello se debe considerar la gráfica del Anexo 2.

Esta gráfica define la condición de tránsito de la infiltración aceptable que deben tener los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales, su valor de frontera está definido por  $f \leq 3 \times 10^{-10} \text{seg}^{-1}$  que representa el factor de tránsito de la infiltración, el cual relaciona a la velocidad promedio final de infiltración contra los diferentes espesores de los materiales de la zona no-saturada incluyendo la porosidad de ellos, según la siguiente fórmula:

$$f = (K \cdot i) / (U \cdot d)$$

Donde:

f = factor de tránsito de la infiltración, ( $\text{seg}^{-1}$ ).

d = espesor de la zona no-saturada, (m).

U = porosidad promedio efectiva de los materiales de la zona no-saturada, (adimensional).

i = gradiente hidráulico, (adimensional).

$K =$  conductividad hidráulica promedio de los materiales de la zona no-saturada, (m/s).

La velocidad promedio ( $v$ ) se calcula a partir de la conductividad hidráulica saturada ( $K$ ) de los materiales del subsuelo en la zona no-saturada, dividida por la porosidad promedio efectiva ( $U$ ), considerando un gradiente hidráulico unitario ( $i$ ), de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$V = Ki/U.$$

El valor de ( $f$ ) obtenido, para el caso de que se trate, debe graficarse para determinar su aptitud y viabilidad. Los sitios aptos son aquellos cuyo factor de tránsito de la infiltración es:

$$f \leq 3 \times 10^{-10} \text{ seg}^{-1}.$$

#### 4.3.1.6 Aplicación de tecnologías y sistemas equivalentes

Previa autorización de los Gobiernos de los Estados o en su casos de los Municipios, con arreglo a las disposiciones de la presente Norma Oficial Mexicana, se pueden elegir sitios de disposición final de residuos sólidos municipales que no reúnan alguna de las condiciones establecidas anteriormente, cuando se realicen obras de ingeniería, cuyos efectos resulten equivalentes a los que se obtendrían del cumplimiento de los requisitos previstos en los puntos 3.2.1.1, 3.2.2.1, 3.2.2.3, 3.2.3.2, 3.2.3.3, 3.2.4.1, 3.2.4.2, 3.2.5.1 de esta Norma Oficial Mexicana; obras con las cuales se debe acreditar técnicamente que no se afectaría negativamente al medio ambiente.

### 5. GRADO DE CONCORDANCIA CON NORMAS Y RECOMENDACIONES INTERNACIONALES

5.1 No hay normas equivalentes, las disposiciones de carácter técnico que existen en otros países no reúnen los elementos y preceptos de orden técnico y jurídico que en esta Norma se integran y complementan de manera coherente con base en los fundamentos técnicos y científicos reconocidos internacionalmente.

### 6. BIBLIOGRAFIA

- 6.1 Manual de Relleno Sanitario SEDUE, Subsecretaría de Ecología, 1984, México.
- 6.2 Manual de Hidráulica Azevedo Álvarez (Editorial Harla), México.
- 6.3 Mecánica de Suelos. E. Juárez Badillo y A. Rico Rodríguez (1970), México.
- 6.4 Sanitary Landfill Design and Operation Dr. Brunner & D.J. Keller, U.S.E.P.A. 1971. (Diseño y operación de un relleno sanitario) E.U.A.
- 6.5 Guía de Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios. Manuales de la Organización Panamericana de la Salud. Jorge Jaramillo y Francisco Zepeda (1991).
- 6.6 Practical Waste Management. John R. Holmes (1983). Editorial John Wiley & Sons (Manejo práctico de residuos), E.U.A.
- 6.7 Estudio de Comportamiento de un Relleno Sanitario mediante una celda de control (1992). Dirección General de Servicios Urbanos D.D.F., México.
- 6.8 Groundwater, R. Allan Freeze / John A. Cherry, Prentice Hall Inc. (1979) (Agua subterránea) E.U.A.
- 6.9 Diccionario de Mineralogía y Geología, Lexis 22, Barcelona, España (1980).
- 6.10 Dictionary of Geological Terms. The American Geological Institute, (1984) E.U.A. (Diccionario de términos geológicos) E.U.A.



- 6.11 The Geochemistry of Natural Waters, Drever, J. Prentice Hall E.U.A. (1982).  
6.12 Determinación del Riesgo de Contaminación de Aguas Subterráneas, CEPIS, OPS, Foster S., Hirata R., Lima Perú, (1988).  
6.13 Introduction to Geochemistry, Segunda Edición, Mc. Graw-Hill Book Co, Krauskopf K. E.U.A. (1979). (Introducción a la geoquímica).  
6.14 Earth, W. H. Freeman and Company, Press F., Siever R. E.U.A. (1986). (La Tierra).

## **7. OBSERVANCIA DE ESTA NORMA**

7.1 Los sitios destinados a la disposición final de residuos sólidos municipales que operan actualmente, tienen un plazo de tres años a partir de su publicación en el Diario Oficial de la Federación para regularizar su situación de acuerdo a los preceptos de esta Norma.

7.2 La vigilancia del cumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, a los Gobiernos del Distrito Federal, de los Estados y Municipios en el ámbito de su jurisdicción y competencia, cuyo personal realizará los trabajos de inspección y vigilancia que sean necesarios. Las violaciones a la misma se sancionarán en los términos de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y demás ordenamientos jurídicos aplicables.

7.3 La presente Norma Oficial Mexicana entrará en vigor al día siguiente de su publicación en el **Diario Oficial de la Federación**.

**México, Distrito Federal a los catorce días del mes de agosto de mil novecientos noventa y seis.**

**LA SECRETARIA DE MEDIO  
AMBIENTE, RECURSOS  
NATURALES Y PESCA**

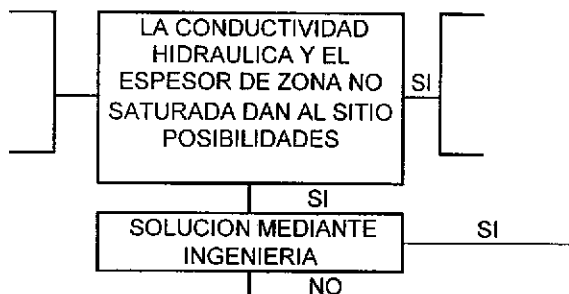
**JULIA CARABIAS LILLO**

11-octubre-1996  
15:30 horas

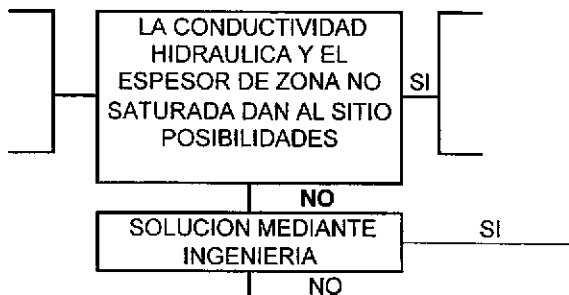
ACLARACION a la Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL-1996, Que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales, publicada el 25 de noviembre de 1996.

**Al margen un sello con el Escudo Nacional, que dice: Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.**

En el Anexo 1 de esta Norma Oficial Mexicana, denominado DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LAS DIFERENTES ETAPAS DE LOS ESTUDIOS, en su continuación página 48, aparece un cuadro con la letra B, tomando como base éste y contando de izquierda a derecha en el cuarto cuadro, dice:



DEBE DECIR:



Atentamente  
 Sufragio Efectivo. No Reelección.  
 México, D.F., a 11 de enero de 1997.- El Director General de Asuntos Jurídicos, **Martín Díaz y Díaz**.- Rúbrica.

## Anexo C: Países considerados como menos desarrollados

Área Geográfica					
África		Asia		SIDS	
1	Angola	1	Afganistán	1	Cabo Verde
2	Benin	2	Bangladesh	2	Camores
3	Burkina Faso	3	Bután	3	Haití
4	Burundi	4	Camboya	4	Kiribati
5	República Central Africana	5	República Dem. de Laos	5	Maldivas
6	Chad	6	Myanmar	6	Samoa
7	República Democrática del Congo	7	Nepal	7	Santo Tomé y Príncipe
8	Djibouti	8	Yemen	8	Islas Salomón
9	Guinea Ecuatorial			9	Tuvalu
10	Eritrea			10	Vanuatu
11	Etiopía				
12	Gambia				
13	Guinea				
14	Guinea Bissau				
15	Lesoto				
16	Madagascar				
17	Malawi				
18	Mali				
19	Mauritania				
20	Mozambique				
21	Nigeria				
22	Ruanda				
23	Senegal				
24	Sierra Leona				
25	Sudán				
26	Togo				
27	Uganda				
28	Tanzania				
29	Zambia				
30	Liberia				
31	Somalia				

SIDS: Pequeños Estados Insulares en Desarrollo



# REFERENCIAS

## Bibliografía

- Guía para la implementación de los Mecanismos flexibles de Kyoto-MDL en Latino América y el Caribe. Enero 2005.
- Proyecto OLADE/CEPAL/GTZ "Energía y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe". Serie Recursos naturales e infraestructura. Publicación de las Naciones Unidas. Junio 2002. Santiago de Chile.
- Alternativas de Rellenos Sanitarios. Guía de Toma de Decisión, del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), editada por la Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México y GTZ.
- Manual para la preparación de proyectos de generación de energía a partir de gas de rellenos sanitarios en América latina y el Caribe. Banco Mundial. Abril 2004.

## Páginas de internet

- [http://www.ciceana.org.mx/guias\\_tematicas/impactos\\_ambientales/atmosfera/atmosfera.doc](http://www.ciceana.org.mx/guias_tematicas/impactos_ambientales/atmosfera/atmosfera.doc)
- <http://www.presenciaciudadana.org.mx/tablaghg.html>
- Cambio Climático Reporte del IPCC: 2001 <http://www.fisica.unam.mx/carlos//Enviroment/reporte2001.htm>
- Cuidar el Clima. Guía de la Convención sobre el Cambio Climático y P. de K. UNFCCC 2000; [http://130.37.129/IVM/research/climatechange/fb\\_Handbook.htm](http://130.37.129/IVM/research/climatechange/fb_Handbook.htm)
- [http://www.ciceana.org.mx/guias\\_tematicas/impactos\\_ambientales/atmosfera/cambio\\_climatico/CambioClimatico.doc](http://www.ciceana.org.mx/guias_tematicas/impactos_ambientales/atmosfera/cambio_climatico/CambioClimatico.doc)
- <http://info.juridicas.unam.mx/publica/rev/cont.htm?r=derint>
- [http://www.cpcecf.rg.ar/Desarrollo/Pgs/comision/com\\_34.htm](http://www.cpcecf.rg.ar/Desarrollo/Pgs/comision/com_34.htm)
- Oficina Colombiana para la Mitigación del Cambio Climático [http://www.cecodes.org.co/cambio\\_climatico/ocmcc.htm#1](http://www.cecodes.org.co/cambio_climatico/ocmcc.htm#1)
- Fondo Nacional Del Ambiente Perú: <http://www.fonamperu.org/general/mdl/procedimientos.asp>
- [http://www.mma.es/oecce/pdf/guia\\_mex.pdf#search='actores%20del%20MDL'](http://www.mma.es/oecce/pdf/guia_mex.pdf#search='actores%20del%20MDL')
- <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/cursos/aseourba/aseourba.html>
- [http://www.semarnat.gob.mx/portal/boletinesdgi/boletin\\_mpios/docs\\_num1/art\\_rellsan1.htm](http://www.semarnat.gob.mx/portal/boletinesdgi/boletin_mpios/docs_num1/art_rellsan1.htm)
- <http://www.semarnat.gob.mx/ssfna/legislaci%F3n>
- <http://epa.gov/ttn/atw/landfill/landflpg.html>
- [http://www.bancomundial.org.ar/lfg/gas\\_access\\_008\\_es.htm](http://www.bancomundial.org.ar/lfg/gas_access_008_es.htm)
- [http://www.bancomundial.org.ar/lfg/gas\\_other\\_project\\_005\\_es.htm](http://www.bancomundial.org.ar/lfg/gas_other_project_005_es.htm)
- <http://www.jenbacher.com/spain/motores.htm>
- <http://www.arbutusrenewables.com/proyectos-energia-simeprodeso.html>
- <http://dgcnesyp.inegi.gob.mx/cgi-win/bdieintsi.exe/Consultar>
- <http://www.cfe.gob.mx>
- <http://www.cnbv.gob.mx/recursos/glosario%20D.htm>
- <http://www.laas.com.mx/articulos/955468225.html>
- <http://unfccc.int/2860.php>
- [http://unfccc.int/parties\\_and\\_observers/items/2704.php](http://unfccc.int/parties_and_observers/items/2704.php)
- [http://www.semarnat.gob.mx/ssfna/Legislaci%F3n%20Ambiental/NormasO/residuos/residuos\\_nom083.htm](http://www.semarnat.gob.mx/ssfna/Legislaci%F3n%20Ambiental/NormasO/residuos/residuos_nom083.htm)