

## II.- MATERIALES Y METODOS.

### II.1. Muestreo

Para un conocimiento específico de las características cuantitativas que identifican a los residuos sólidos de cada fuente generadora, se realizarán los estudios con base a la siguiente normatividad:

NOM-AA-61-1985 Determinación de la generación.

NOM-AA-15-1985 Método de cuarteo.

NOM-AA-19-1985 Determinación de la composición física.

NOM-AA-22-1985 Determinación del peso volumétrico *in situ*

Para el diseño del servicio de limpia municipal, así como para el establecimiento de líneas estratégicas de acción referentes al manejo de los residuos sólidos municipales, son fundamentales las características y composición de las fuentes principales de generación de estos.

Dentro de los estudios a este respecto, se deben realizar una serie de actividades encaminadas a la obtención de ciertos parámetros de diseño, necesarios para el establecimiento de actividades posteriores. Los indicadores básicos para el diseño del sistema de limpia son:

- Generación
- Composición
- Peso volumétrico
- Características físicas, químicas y biológicas

Estos estudios se realizarán para diferentes tipos de municipios, por estratos socioeconómicos y por fuentes generadoras, pues en una población existen diferencias en cantidad y composición de la basura. Además, el período de muestreo es representativo de las actividades de la región.

Para determinar la generación *per capita* de los residuos sólidos provenientes de casas habitación como en otro tipo de fuentes, excepto las industriales, se ha de emplear la NOM-AA-61-1985, ( Ver Tabla 1 ).

Así mismo, se podrán aplicar programas intensivos de taras y pesajes para conocer las toneladas de basura que se generan de fuentes no domésticas.

Dentro de la norma se hace aclaración que se parte de un muestreo estadístico aleatorio, utilizando un muestreo descrito en el método de cuarteo (NMX-AA-15-1985).

### **Materiales y equipo.**

- Báscula con capacidad mínima de 100 kg y precisión de 10 g.
- Báscula con capacidad mínima de 10 kg y precisión de 1g.
- Cédulas de campo
- Tablas de inventario
- Marcadores tinta negra
- Lápices, gomas, papelería en general.
- Bolsas de polietileno de 0.7m x 0.5 m y calibre 200.
- Ligas de hule de 1.5 mm ancho
- Guantes de hule para uso industrial.

### **Procedimiento de campo es el siguiente**

1. Información obtenida de un muestreo estadístico aleatorio en campo, con duración de 7 días más 1 día de "operación purga", para cada uno de los estratos Socio económico de la población.
2. Selección del nivel de confianza con que se realiza el muestreo con base en: conocimiento de la localidad, calidad técnica del personal participante, facilidad para realizar el muestreo, características de la localidad a muestrear, etc.
3. Se define el tamaño de la premuestra, a partir del nivel de confianza seleccionado
4. Delimitar y ubicar el universo de trabajo (300 a 500 casas) en un plano actualizado de la localidad, acorde con el estrato socioeconómico por muestrear.

<b>PROBABILIDAD %</b>	<b>RIESGO SELECCIONADO</b>	<b>TAMAÑO DE LA PREMUESTRA</b>
95	0.05	115
90	0.10	80
80	0.20	50

**Tabla 1 Muestreo**

5. Recorrer la zona seleccionada, visitando a los habitantes de las casas seleccionadas para explicarles la razón del muestreo y captar la información general que se indica en la hoja encuesta, además de entregar una bolsa de polietileno y el folleto explicativo referente al estudio por realizar.
6. Visitar nuevamente las casas seleccionadas el primer día que se realiza el período de muestreo, lo más temprano posible, para recoger las bolsas conteniendo los residuos sólidos generados antes de ese día. Esto es una operación limpieza, para garantizar que el residuo generado después de ella corresponde a un día. Se entrega una nueva bolsa.
7. A partir del segundo al séptimo día del período de muestreo se recogen las bolsas conteniendo los residuos generados el día anterior y a su vez se entrega una nueva bolsa. Al octavo día sólo se recogen las bolsas con los residuos generados el día anterior.
8. Para obtener el valor de la generación *per capitade* residuos sólidos en kg/habitante-día correspondiente a la fecha en que fueron generados, se divide el peso de los residuos entre el número de habitantes de la casa.

### **Evaluación de resultados**

1. Calcular el promedio de generación durante el tiempo de muestreo
2. Realizar el análisis de rechazo de observaciones sospechosas
3. Una vez rechazadas o aceptadas las observaciones sospechosas, se realiza el análisis estadístico de los  $n$  valores promedio resultantes, para obtener la media de la generación *per capita* diaria
4. Verificar el tamaño de la premuestra, calculando el tamaño real de la muestra para tener un análisis confiable
5. Realizar un análisis de confiabilidad (pruebas de hipótesis y análisis de varianza).

### **Tratamiento de la información.**

1. Generación *per capita* de residuos sólidos de todo el período de muestreo, por estrato socioeconómico muestreado, incluyendo sus estadísticos (desviación estándar, varianza, tamaño de muestra, media, promedio, etc.).

## RESIDUOS SÓLIDOS Y METODOS

2. Generación *per capita* diaria, para cada uno de los días en que se realizó el muestreo, por estrato socioeconómico muestreado, incluyendo sus estadísticos.

En la Tabla 2 se presentan estimaciones de generación *per capita* de residuos sólidos municipales en diversas regiones del país, según datos de SEDESOL.

El Estado de México se encuentra en la clasificada como zona centro del país.

ZONA	GENERACION (KG/HAB/DIA)
Fronteriza	0.956
Norte	0.891
Centro	0.788
Distrito Federal	1.329
Sureste	0.679
Promedio	0.853

**Tabla 2. Generación de residuos sólidos municipales por zonas a nivel nacional**

Fuente: SEDESOL, Dirección de Residuos Sólidos. Situación Actual del Manejo Integral de los Residuos Sólidos en México. (1999)

El conocimiento de la **producción de residuos** permite decidir: a) equipos de recolección más adecuados; b) cantidad de personal; c) rutas; d) frecuencia de recolección; e) área para disposición final; f) costos, y g) establecimiento de tarifas.

La producción diaria de residuos sólidos se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$Dsp = Pob \times gpc$$

donde:

Dsp = cantidad de residuos sólidos producidos (kg/día)

Pob = población del área

gpc = generación *per capita*(kg/hab día)

La **producción anual** de desechos sólidos se debe estimar con base en las proyecciones de crecimiento de la población y la generación *per capita*. En cuanto a la gpc, difícilmente se encuentran cifras acerca de la variación anual, para tratar de evaluar los cambios. No obstante, puesto que con el desarrollo y el crecimiento urbanístico y comercial de la población los índices de producción aumentan, se recomienda calcular con una tasa de incremento del 1% anual la producción *per capita* total<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Fuente: Según estimaciones de la Organización Panamericana de la Salud en la Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. 1991

### **Metodología del Muestreo - método de cuarteo**

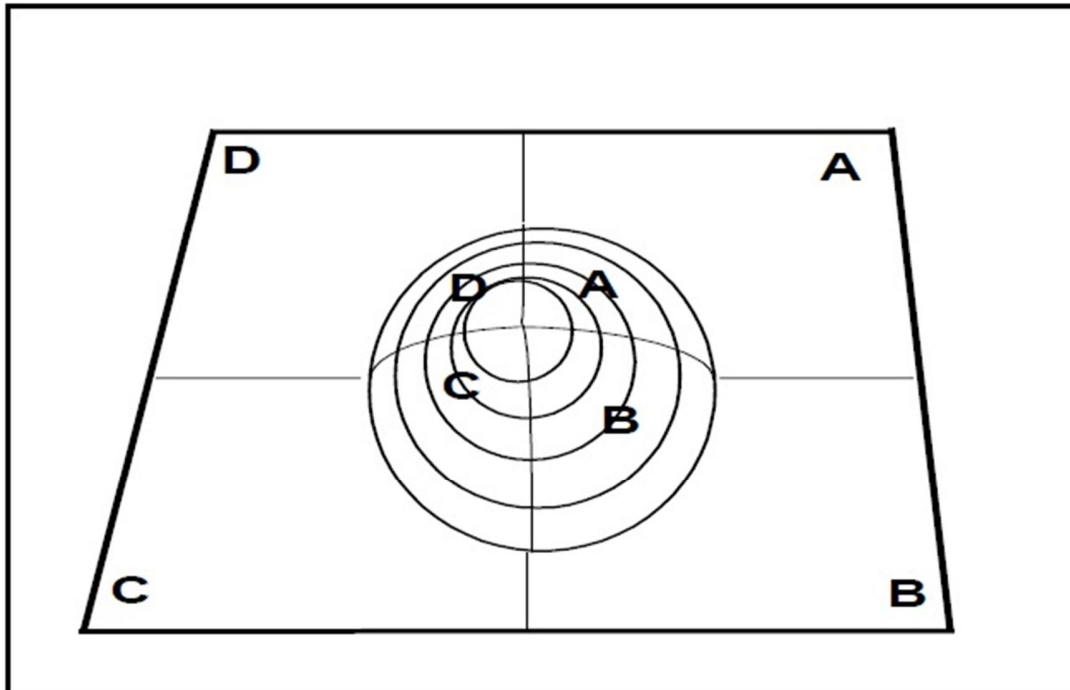
La NMX-AA-15-1985, referente a la forma de realizar un muestreo para residuos sólidos municipales, establece el método de cuarteo para las diferentes determinaciones de campo y laboratorio. El objetivo es contar con residuos de características homogéneas.

### **Materiales y equipo**

- Báscula de piso con capacidad de 100 Kg.
- Palas curvas
- Bieldos
- Overoles
- Guantes de hule para uso industrial
- Escobas

### **Procedimiento**

1. Para realizar el cuarteo, se toman los residuos sólidos resultados del muestreo para el estudio de generación.
2. El contenido se vacía formando un montón o pila sobre un área plana horizontal de 4m por 4m.
3. El montón de residuos sólidos se traspalea hasta homogeneizarlos, se divide en cuatro partes iguales A,B,C,D y se eliminan las partes opuestas A y C o B y D, repitiendo esta operación hasta dejar un mínimo de 50 kg, para selección de subproductos, (Ver figura 3).



**Figura 3. Método de cuarteo para muestras de residuos sólidos.**

4. De las partes eliminadas del primer cuarteo se toman 10 kg, para análisis físicos, químicos y biológicos. Con el resto se determina el peso volumétrico.

#### **Peso volumétrico *in situ***

Esta determinación de los residuos sólidos generados por cualquier fuente, exceptuando la industrial, deberá realizarse empleando las normas oficiales

- NMX-AA-22-1985 Peso volumétrico *in situ*

Para determinar el peso volumétrico *In situ*, de las muestras de basura sin compactar procedentes de domicilios y comercios, se deben tomar los residuos eliminados de la primera operación de cuarteo. Para efectuar esta determinación se requieren cuando menos dos personas.

### **Materiales y equipo.**

- Básculas de piso con capacidad de 200 kg
- Tambos metálicos de forma cilíndrica, con capacidad de 200 l
- Palas curvas
- Overoles
- Guantes de hule para uso industrial
- Escobas
- Botas de hule
- Mascarillas
- Cédulas de campo
- Papelería en general.

### **Procedimiento**

1. Verificar que el recipiente esté limpio y libre de abolladuras (tambos metálicos con capacidad de 200 l).
2. Se pesa el recipiente.
3. Se llena el recipiente hasta el tope con residuos sólidos homogeneizados obtenidos de las partes eliminadas del primer cuarteo. Golpear el recipiente contra el suelo tres veces, dejándolo caer desde una altura de 10 cm.
4. Nuevamente se agregan residuos sólidos hasta el tope, teniendo cuidado de no presionar
5. Se debe obtener el peso neto de los residuos sólidos, se pesa el recipiente con éstos y se resta el valor de la tara.
6. El peso volumétrico del residuo se calcula mediante:

$$P_v = P / V = \text{kg/m}^3$$

Donde:

$P_v$  = Peso volumétrico del residuo sólidos, en Kg/m<sup>3</sup>

$P$  = Peso bruto de los residuos sólidos menos tara, en Kg

$V$  = Volumen del recipiente, en m<sup>3</sup>

### Tratamiento de la información

1. Indicar, como en las determinaciones de generación, los promedios de los pesos volumétricos obtenidos en los diferentes estratos socioeconómicos y fuentes generadoras (domicilios y comercios).
2. Los pesos volumétricos *in situ* por estrato socioeconómico y por fuente generadora, obtenidos en cada uno de los días del período de muestreo, así como sus estadísticos.

TIPOS DE FUENTES GENERADORAS	PESO VOLUMETRICO <i>IN SITU</i> (KG/M <sup>3</sup> )
Domésticos	187
Comerciales	280
Servicios	169
Especiales	182
Áreas Publicas	144
Otros	Variable

**Tabla 3 Peso volumétrico *in situ* de los residuos sólidos municipales generados, por tipos de fuentes**

Fuente: Informe de la situación general en materia de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. (1991-1992) SEDESOL.

## II.2. Caracterización

Composición es el término utilizado para describir los componentes individuales que constituyen el flujo de residuos sólidos y su distribución relativa basada en porcentajes por peso.

La información sobre la composición de los residuos sólidos es importante para evaluar las necesidades de equipo, los sistemas y los programas y planes de gestión. Por ejemplo, si los residuos sólidos generados en una instalación comercial se componen solamente de productos de papel, puede ser apropiado el uso de un equipo especial de procesamiento; también se puede considerar la recolección por separado o si la ciudad está involucrada en un programa de reciclaje de productos de papel.

La composición de los residuos sólidos generados por cualquier fuente, excepto la industria, se determina mediante las normas oficiales siguientes:



NMX-AA-15-1985 Método de cuarteo

NMX-AA-22-1985 Selección y cuantificación de subproductos

La muestra se extrae como se describe en la NMX-AA-15-1985; se toman como mínimo 50 kg que proceden de las áreas del primer cuarteo que no fueron eliminadas.

### **Materiales y equipo.**

- Báscula de piso con capacidad de 100 kg
- Báscula con capacidad para 10 kg y precisión de 1g
- Criba M 2.00
- Mascarillas
- Recogedores
- Overoles
- Escobas
- Botas de hule
- Guantes de hule para uso industrial
- Bolsas de polietileno, de 1.1 m x 0.9 m y calibre 200
- Cédulas de campo
- Papelería y varios.

### **Procedimiento**

1. Se seleccionan los sub productos depositándolos en bolsas de polietileno hasta agotarlos, de acuerdo con la siguiente clasificación:

- a) *Algodón*: incluye material de curación, toallas sanitarias, fibras naturales(estopa), relleno de sillas y sillones.
- b) *Cartón*, considerando materiales de empaque liso, rugoso, natural (café), con pintura o blanqueado.
- c) *Cuero*, piel curtida de cualquier origen, en cualquier forma y color.
- d) *Residuo fino* que pase la criba M 2.00,
- e) *Envase de cartón encerado*, del tipo de envases de leche fresca o tetra pack.
- f) *Fibra dura vegetal*, como tallos y raíces (estructuras delgadas y largas)

- g) *Fibras sintéticas* como el nylon, poliéster entre otras.
- h) *Hueso* y materiales cartilagosos, que no procedan de desperdicios de comida, pero si de carnicerías o expendios de pollo.
- i) *Hule*, como empaques, ligas, llantas, suelas de zapato.
- j) *Latas* de fierro y aluminio.
- k) *Loza y cerámica*, que por lo regular se presentan en padecería (platos, tazas, ollas)
- l) *Madera*, ya sea como materiales de desecho de utensilios domésticos, pero no de escombros de construcción.
- m) *Material de construcción*, como escombros, tirolés, yeso, cemento, cimbras, marcos metálicos de puertas y/o ventanas.
- n) *Material ferroso*, diferente a las latas y material de construcción.
- o) *Material metálico no ferroso*, como aluminio, pero que sea diferente a las latas y a los escombros de construcción (ejemplo: salpicaderas, estructuras de bicicletas, etc.)
- p) *Papel*, en todas sus formas (periódico, de oficina, higiénico, de empaque, texturas y colores, pudiendo venir o no con cobertura de aluminio, encerado o plástico.
- q) *Pañal desechable* sencillo o con gelatinizado de líquidos.
- r) *Plástico de película* o polietileno de baja densidad (LDPE), con el que se fabrican la mayoría de las bolsas, con color o transparentes.
- s) *Plástico rígido*, dentro del cual se encuentran el polietilentereftalato (PET o #1), polietileno de alta densidad ( HDPE o # 2), el cloruro de polivinilo (PVC o #3) , polipropileno (PP o #4); materiales de los cuales están elaborados la mayor parte de los empaques comerciales.
- t) *Poliuretano*, plástico con el que se elaboran varios de los objetos de uso doméstico como cubetas, tinas, baldes, etc.
- u) *Poliestireno expandido* o unicel, material empleado como aislante o empaque.

v) *Residuos alimenticios* provenientes de casas habitación, restaurantes y/o centros de servicio.

w) *Residuos de jardinería*, como pasto, material de poda, hojarasca, etc.

x) *Trapo*, de origen vegetal o sintético.

y) *Vidrio de color*, ámbar, verde, azul, rojo.

z) *Vidrio transparente*

1) *Otros*. En esta categoría se encuentra cualquier otro residuo no clasificado anteriormente, como: medicamentos, baterías, productos de limpieza, objetos de uso doméstico, etc.

2. Los productos ya separados se pesan por separado en la balanza y se registra el resultado.

3. El porcentaje en peso de cada uno de los subproductos se calcula así:

$$PS = (G_1 / G) \times 100$$

Donde:

PS = Porcentaje del subproducto considerado

G<sub>1</sub> = Peso del subproducto considerado, en Kg, descontando el peso de la bolsa empleada

G = Peso total de la muestra (mínimo 50 Kg)

### **Tratamiento de la información**

1. Composición diaria de los residuos sólidos, por estrato socioeconómico y por fuente generadora, obtenida en cada uno de los días del periodo de muestreo.

2. Promedio de las composiciones diarias obtenidas durante el periodo de muestreo en peso y en porciento de los residuos sólidos, por estrato socioeconómico y por fuente generadora.

<b>Categoría de Residuo</b>	<b>Datos Específicos al Sitio</b>
Comida	25.5%
Papel y Cartón	17.5%
Poda (jardines)	14.5%
Madera	2.4%
Caucho, Piel, Huesos y Paja	6.0%
Textiles	4.0%
Papel Higiénico	3.0%
Otros Orgánicos	4.0%
Pañales (asume 20% orgánico / 80% inorgánico)	2.0%
Metales	3.0%
Construcción y Demolición	6.0%
Vidrio y Cerámica	5.0%
Plásticos	5.0%
Otros Inorgánicos	2.1%
Porcentaje de degradación muy rápida (1)	29.9%
Porcentaje de degradación moderadamente rápida (2)	14.0%
Porcentaje de degradación moderadamente lenta (3)	21.5%
Porcentaje de degradación muy lenta (4)	8.4%
Total Orgánicos	73.8%
Total Inorgánicos	26.2%
Porcentaje de degradación muy rápida (1)	70%
Porcentaje de degradación moderadamente rápida (2)	50%
Porcentaje de degradación moderadamente lenta (3)	7%
Porcentaje de degradación muy lenta (4)	12%
Residuos en Estados Unidos - % de orgánicos secos	
Lo de degradación rápida calculado	69
Lo de degradación moderadamente rápida calculado	115
Lo de degradación moderadamente lenta calculado	214
Lo de degradación lenta calculado	202

**Tabla 4 Caracterización de residuos sólidos urbanos correspondientes a la zona conurbada del sur de Tamaulipas**

**La técnica empleada para los análisis fueron los siguientes:**

### **1.-Determinación de Humedad (NMX-AA-16-1984).**

Esta Norma Mexicana establece el método llamado de Estufa que determina el porcentaje de humedad, contenido en los residuos sólidos municipales; se basa en la pérdida de peso que sufre la muestra cuando se somete a las condiciones de tiempo y temperatura que se establecen en esta norma, considerando que dicha pérdida se origina por la eliminación de agua.

#### **Equipamiento**

- Balanza analítica con sensibilidad de 0.001g
- Espátula para balanza
- Estufa con temperatura 423K (150°C) con sensibilidad 1.5K (1.5°C) capaz de mantener una temperatura constante
- Cajas de aluminio con tapa de 250cm<sup>3</sup>
- Guantes de asbesto
- Desecador con deshidratante
- Equipo usual de laboratorio

#### **Procedimiento**

- Se coloca la caja abierta y su tapa en la estufa a 393K (120°C) durante dos horas, transcurrido ese tiempo, se tapa la caja dentro de la estufa, e inmediatamente se pasa al desecador durante dos horas como mínimo o hasta obtener peso constante.
- Se vierte la muestra sin compactar hasta un 50% del volumen de la caja.
- Se pesa la caja cerrada con la muestra y se introduce destapada a la estufa a 333K(60°C) durante 2 horas, se deja enfriar y se pesa nuevamente. Se repite esta operación las veces que sea necesario hasta obtener peso constante (se considera peso constante cuando
- entre dos pesadas consecutivas la diferencia es menor al 0.01%).

### **2.-Determinación de pH-Método potencio métrico (NMX-AA-25-1984).**

La presente norma establece el método potencio métrico para la determinación del valor del pH en los residuos sólidos. El cual se basa en la actividad de los iones hidrógeno presentes en una solución acuosa de residuos sólidos al 10%.

### Equipamiento

- Balanza analítica con sensibilidad de 0.001 g.
- Potenciómetro con compensador de temperatura, electrodo de vidrio y electrodo de referencia.
- Agitador magnético con magnetos recubiertos de teflón o agitador mecánico.
- Termómetro de vidrio con escala de 263 K a 393 K (-10°C a 120°C).
- Equipo usual de laboratorio

### Procedimiento

- Calibrar el potenciómetro con las soluciones amortiguadoras de pH=4, pH=7 y pH=11, según sea el tipo de residuo sólido por analizar.
- Pesar 10 g de muestra y transferirlos a un vaso de precipitado de 250 cm<sup>3</sup>
- Añadir 90 cm<sup>3</sup> de agua destilada.
- Mezclar por medio del agitador durante 10 minutos
- Dejar reposar la solución durante 30 minutos.
- Determinar la temperatura de la solución. Sumergir los electrodos en la solución y hacer la medición de pH.
- Sacar los electrodos y lavar con agua destilada.
- Sumergir los electrodos en un vaso de precipitados con agua destilada

### 3.-Determinación de cenizas (NMX-AA-18-1984).

Esta Norma Mexicana establece el método de prueba para la determinación de cenizas de los residuos sólidos municipales.

### Equipamiento

Equipo usual de laboratorio y:

- Balanza granataria con sensibilidad de 0.1 g
- Mufia
- Crisol de porcelana o platino de 50 cm<sup>3</sup>
- Desecador que contenga algún deshidratante adecuado con indicador de saturación.

### Procedimiento

- La muestra se seca hasta peso constante a 333 K (60°C) y se deja enfriar en el desecador.
- Poner a peso constante el crisol a temperatura de 473 K (200°C) durante dos horas, se deja enfriar en el desecador y se pesa.
- Transferir al crisol aproximadamente 20 g de la muestra seca (que se indica en
- y se pesa con aproximación de 0.1 g
- Calcinar en la mufla a 1073 K (800°C) hasta obtener peso constante (se recomienda comprobar el peso constante transcurrida una hora) se deja enfriar en el desecador y se pesa.

### 4.-Determinación de Materia Orgánica (NMX-AA-21-1985).

La presente Norma Oficial Mexicana establece el método para la determinación de materia orgánica en los residuos sólidos municipales.

### Equipamiento

Los reactivos que a continuación se mencionan deben ser de grado analítico a menos que se indique otra cosa; cuando se hable de agua, debe entenderse agua destilada.

- Sulfato Ferroso 0.5 N.
- Dicromato de Potasio 1 N.
- Difenilamina al 1 %.
- Acido sulfúrico concentrado al 98%.
- Acido Fosfórico al 95%.

### Procedimiento

1. Simultáneamente correr un blanco por cada serie para obtener el factor de corrección.
2. Triturar la muestra en un mortero hasta obtener una consistencia similar al talco.
3. Pesar 0.1 g de la muestra y transferirlos a un matraz Erlenmeyer de 250 cm<sup>3</sup> ó mayor.
4. Agregar con bureta 10 cm<sup>3</sup> de dicromato de potasio

5. Agregar 20 cm<sup>3</sup> de ácido sulfúrico concentrado.
6. Agitar enérgicamente durante un minuto.
7. Dejar reposar durante 30 minutos.
8. Posteriormente agregar 100 cm<sup>3</sup> de agua.
9. Agregar 10 cm<sup>3</sup> de ácido fosfórico.
10. Añadir 0.5 cm<sup>3</sup> de difenilamina
11. Titular con sulfato ferroso 0.5 N hasta que vire de violeta oscuro a verde.

### **5.-Determinación de Poder calorífico (NMX-AA-33-1985).**

Esta Norma Oficial Mexicana especifica un método de prueba para determinar el poder calorífico de los residuos sólidos municipales, empleando una bomba calorimétrica de los diferentes tipos para planear y diseñar los sistemas adecuados de disposición final de los mismos.

#### **Equipamiento**

1. Balanza analítica con sensibilidad de 0.000 1 g.
2. Calorímetro formado por un recipiente equipado con una camisa al vacío ó de agua y con una cubierta para protegerla de las corrientes de aire. En el caso de emplearse camisa de agua, la capacidad de ésta no debe ser menor de 5 veces el equivalente del agua del calorímetro cargado y la temperatura uniforme de la cubeta de agua se obtiene con un aparato de agitación adecuada.
3. Bomba calorimétrica con capacidad no menor de 300 cm<sup>3</sup>.
4. Cápsula de platino (ó de otro material recomendado por el proveedor) de 2.5 a 5 cm<sup>3</sup> de capacidad.
5. Prensa rastilladora.
6. Soporte para montaje de bomba de oxígeno.
7. Cronómetro.
8. Tanque de oxígeno comercial con dos manómetros, que indiquen la presión interior del tanque y de la bomba.
9. Balanza de torsión con sensibilidad de 0.1 g.
10. Calentador de agua con especificaciones de acuerdo el modelo del calorímetro empleado.
11. Refrigerador.
12. Estufa con rango de temperatura ambiente a 353 K (80°C).
13. Regulador de tensión.



### Procedimiento

1. El aparato se calibra usando como material combustible una cápsula de ácido benzóico de peso conocido (0.9 a 1.25 g) y se procede de la misma manera que en el caso de una muestra problema.
2. La muestra se seca a peso constante y se pesan de 0.6 a 1.5 g para formar en la prensa, una pastilla de peso conocido.
3. Unir 10 cm de alambre de encendido a los electrodos del cabezal .
4. Introducir la pastilla dentro de la cápsula metálica de combustión verificando que el alambre permanezca en contacto con la muestra.
5. Colocar en el interior de la bomba 1 cm<sup>3</sup> de agua destilada cuidando que el agua no toque la muestra.
6. El conjunto se adapta al cilindro de la bomba enroscando el cabezal hasta lograr un cierre hermético.
7. Se introduce oxígeno lentamente en el interior de la bomba a fin de evitar la dispersión del producto en la cápsula, hasta alcanzar una presión de 25 a 35 atmósferas. Se recomienda emplear 30 atmósferas de presión; si se excede la presión de las 35 atmósferas, se desaloja el oxígeno en su totalidad, se cambia la muestra y se repite la determinación. Ambiente y se llevan a la cubeta del calorímetro.
8. Se introduce la bomba dentro de la cubeta empleando una pinza metálica, evitando pérdida de agua.
9. Se conectan los electrodos en la parte superior de la tapa bomba teniendo cuidado de evitar pérdidas de agua.
10. Se cierra el calorímetro y se baja el termómetro que registra la temperatura del agua de la cubeta conjuntamente con el agitador y del elemento primario de medición; cuando el equipo sea automático, verificar que el bulbo de dicho termómetro así como el elemento de agitación queden sumergidos en el agua.
11. En el caso de que el calorímetro cuente con calentador de agua se enciende y se coloca en posición normal de operación, debiendo permanecer bajo estas condiciones un período de 10 minutos antes de operar el equipo. En caso contrario, se requiere de una alimentación de agua caliente siguiendo las condiciones del aparato empleado. El agitador debe permanecer operando un tiempo mínimo de 5 minutos.
12. Encender el equipo y activar el agitador del agua de la cubeta. Asegurar que no existen separaciones en la columna de mercurio de ambos termómetros.
13. Equilibrar las temperaturas del agua de la cubeta del calorímetro con el agua de la camisa, mediante los controles manuales de agua fría y caliente. Si después de 1 ó 2 minutos no hay cambio en las temperaturas ó en la temperatura del sistema, se anota ésta como temperatura inicial. Para evitar errores de paralaje y obtener una lectura precisa del orden de 0.005°C, se emplean lentes apropiados. Referirse a las recomendaciones de proveedor de los termómetros para proceder

de acuerdo a ellos en caso de existir burbujas en el bulbo del termómetro así como separaciones en la columna de mercurio.

14. En equipos automáticos se procede a mantener constantes ambas temperaturas, por medio del sistema automático. Una vez logrado esto, por medio de un cronómetro se asegura la estabilidad de dichas temperaturas durante un lapso de 4 minutos; 4 segundos antes de concluir éste período de 4 minutos, se procede de acuerdo a lo siguiente: Se toma una lectura final cuando el cronómetro registre 13 minutos, entendiéndose que 4 minutos correspondieron al período de estabilización automática y 9 minutos al período posterior a la incineración.

15. Se procede a quemar la muestra, manteniendo oprimido el botón de ignición durante 4 o 5 segundos, accionando al mismo tiempo el cronómetro. En caso de no contar con equipo de control de temperatura automático se procede en forma manual, controlando los flujos de agua fría y caliente para mantener la temperatura del agua de la camisa igual ó ligeramente menor que la temperatura del agua de la cubeta del calorímetro. Cuando el sistema esté alcanzando su temperatura final de equilibrio, debe mantenerse la temperatura en la camisa con variaciones máximas de  $\pm 0.1$  °C, de la temperatura del agua de la cubeta del calorímetro.

16. Anotar la lectura final máxima de acuerdo al instructivo del aparato que se esté empleando, ya que en algunos se registra una sola lectura final después de un tiempo establecido.

17. En aparatos no automáticos se recomienda lecturas a los 30, 45, 60, 75, 90 y 105 segundos, después cada 30 segundos hasta que la temperatura permanezca constante durante 5 minutos.

18. Desalojar el contenido de agua de la camisa oprimiendo el botón de purga, apagar el equipo y asegurar que el agitador de agua, el bulbo del termómetro de registro de la cubeta y el elemento primario de medición del aparato queden fuera de la cubeta del calorímetro.

19. Levantar el termómetro antes de abrir el calorímetro; abrir el calorímetro, desconectar los electrodos, sacar la bomba de la cubeta y abrir la válvula de escape de la bomba lentamente para evitar un flujo de escape violento de residuos de la combustión. Sacar la bomba verificando que la combustión haya sido completa, en caso contrario repetir la determinación.

20. Se transfiere el contenido de la bomba a un vaso de precipitado y se lavan las paredes de la bomba, la tapa, los electrodos y el crisol, con una pizeta de agua destilada y se filtra el lavado.

21. Titular el filtrado con la solución del carbonato de sodio usando como indicador anaranjado de metilo, hasta neutralizar la solución teniendo en cuenta 1 cm<sup>3</sup> de solución de carbonato gastado en la titulación equivale a 1 caloría.

22. Medir los restos de alambre no quemado y restar de los 10 cm iniciales.

### 6.-Determinación de Nitrógeno total (NMX-AA-24-1984).

Esta Norma Mexicana establece el método Kjeldahl para determinar la cantidad de nitrógeno total contenido en los Residuos Sólidos Municipales.

#### Equipamiento

Equipo usual de laboratorio además de:

Aparato de digestión Kjeldahl con extractor de humos

Aparato de destilación Kjeldahl

Matraces Kjeldahl de 800 a 1000 cm<sup>3</sup>

Potenciómetro

NOTA: Se requiere de tres matraces Kjeldahl por muestra

#### Procedimiento

1. Digestión
2. Correr un blanco de agua.
3. Pesar 0.5 g de muestra y se transfiere a un matraz Kjeldahl.
4. Agregar 2 g de ácido salicílico y 40 cm<sup>3</sup> de ácido sulfúrico concentrado, agitar, hasta que el ácido se incorpore totalmente a la muestra, formándose el ácido nitrososalicílico.
5. Dejar reposar 30 minutos, y después añadir 10 g de tiosulfato de sodio con el fin de reducir al ácido nitrososalicílico; agitar y dejar reposar por un período de 5 minutos.
6. Transcurrido el tiempo calentar la mezcla a flama baja en el matraz Kjeldahl hasta que no exista desprendimiento de humos blancos y la solución se clarifique. Continuar la digestión durante 30 minutos más .Retirar el matraz y dejar enfriar a temperatura ambiente.
7. Añadir 1 g de sulfato cúprico y 10 g de sulfato de potasio llevar a digestión hasta que la solución sea incolora ó de color amarillo paja.
8. Preparar un matraz Erlenmeyer de 500 cm<sup>3</sup>, dentro del cual se vierten 25 cm<sup>3</sup> de solución de ácido sulfúrico y de 3 a 4 gotas de solución indicadora de anaranjado de metilo y se coloca abajo del condensador de manera que la punta quede en el seno del líquido.
9. Agregar al matraz Kjeldahl de 4 a 5 granallas de zinc y 10 perlas de vidrio.
10. Adicionar con cuidado 100 cm<sup>3</sup> de solución de hidróxido de sodio 10 N resbalando por las paredes del cuello del matraz y conectar al destilador.
11. Destilación
12. Encender la parrilla del destilador

13. Inclinar el matraz y agregar con mucho cuidado  $150 \text{ cm}^3$ , de la solución de hidróxido de sodio.

El matraz se calienta hasta que destile todo el amoniaco (Un mínimo de  $150 \text{ cm}^3$  de destilado se obtiene aproximadamente en 30 minutos).

14. Colocar el matraz colector del destilado en forma tal que el tubo de vidrio de descarga conectado al condensador quede sobre la boca del matraz libre del contacto con la solución de ácido sulfúrico 0.1N y se continua destilando aproximadamente cinco minutos con el objeto de llenar el tubo de descarga.

15. Se interrumpe el calentamiento, se retira el matraz colector y se titula con la solución de ácido sulfúrico 0.1N hasta que la solución vire a rosa.

### 7.- Determinación de la relación Carbono/Nitrógeno (NMX-AA-067-1985).

La presente Norma Mexicana especifica un método para la determinación de la relación Carbono/Nitrógeno de los Residuos Sólidos Municipales, para planear y diseñar los sistemas adecuados de disposición final de los mismos.

#### Equipamiento

Son los utilizados en las determinaciones de Materia Orgánica y Nitrógeno Total.

#### CALCULOS

La relación Carbono/Nitrógeno (C/N) está en función del % de materia orgánica (%M.O.) obtenida de acuerdo a la constante de Jackson y del % de Nitrógeno total (%N).

Para determinar el contenido de carbono se multiplica el % de materia orgánica x 0.58.

Donde:

0.58 = constante dada por Jackson

Por lo tanto, la ecuación para determinar la relación (C/N) es:

$$(C/N) = \frac{(\% \text{ M.O.}) \times 0.58}{\% \text{ N}}$$

### II.3. Evaluación del potencial energético

El biogás es generado por la descomposición de los residuos en el relleno sanitario bajo condiciones anaeróbicas y puede ser recuperado mediante la instalación de un sistema de captura de biogás que generalmente quema el biogás en antorchas. Alternativamente, el biogás capturado puede ser usado benéficamente como combustible en equipo como moto generadores de combustión interna, micro turbinas, calderas, y otros equipos que usan el biogás para generación de energía eléctrica o térmica.

Además de los beneficios energéticos del uso del biogás, la captura de este biogás ayuda a reducir las emisiones al ambiente. La USEPA ha determinado que las emisiones de biogás de rellenos sanitarios municipales causan o contribuyen significativamente a la contaminación del aire que potencialmente puede causar daños a la salud pública. Algunos de los contaminantes contenidos en el biogás se suponen son carcinógenos, o pueden causar otros efectos adversos a la salud. Algunos problemas para el bienestar público incluyen el mal olor del biogás y el potencial de migración del mismo dentro y fuera de la propiedad del relleno sanitario que podría causar incendios y/o explosiones. El metano emitido por rellenos sanitarios también causa problemas por ser un gas de efecto invernadero que contribuye al cambio climático global.

El objetivo principal del Modelo es proveer en este caso en particular y que es el Relleno Sanitario de la zona conurbada del sur de Tamaulipas, una herramienta para la evaluación de la factibilidad y los beneficios potenciales al capturar y utilizar el biogás generado para la generación de energía eléctrica. Para satisfacer este objetivo el Modelo usa una hoja de cálculo de Excel® para calcular la generación de biogás aplicando una ecuación de degradación de primer grado. El modelo provee estimaciones de la recuperación de biogás multiplicando la generación de biogás por los estimados de la eficiencia con la que el sistema lo recupera, esto es conocida como eficiencia de captura.

El Modelo usa la siguiente información para estimar la generación y recuperación del biogás en el relleno sanitario de la zona conurbada del sur de Tamaulipas:

- “ La cantidad de residuos depositados en el relleno sanitario anualmente.
- “ El año de apertura y clausura del sitio.
- “ El índice de generación de metano (k).
- “ La generación potencial de metano (L0).

- “ El factor de corrección de metano (MCF).
- “ El factor de ajuste por incendios (F).
- “ La eficiencia de recuperación del sistema de captura.

El modelo estima el índice de generación de biogás para cada año usando la ecuación de degradación de primer grado, la cual fue modificada por USEPA en el Modelo LandGEM versión 3.02 en el 2005.

$$Q_{LFG} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2kL_0 \left[ \frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}}) (MCF) (F)$$

Donde: QLFG = Flujo de biogás máximo esperado (m<sup>3</sup>/año)  
 i = Incremento en tiempo de 1 año  
 n = (año del cálculo) . (año inicial de disposición de residuos)  
 j = Incremento de tiempo en 0.1 años  
 k = Índice de generación de metano (1/año)  
 Lo = Generación potencial de metano (m<sup>3</sup>/Mg)  
 Mi = Masa de residuos dispuestos en el año i (Mg)  
 tij= Edad de las sección j de la masa de residuos Mi dispuestas en el año i (años decimales)  
 MCF = Factor de corrección de metano  
 F = Factor de ajuste por incendios

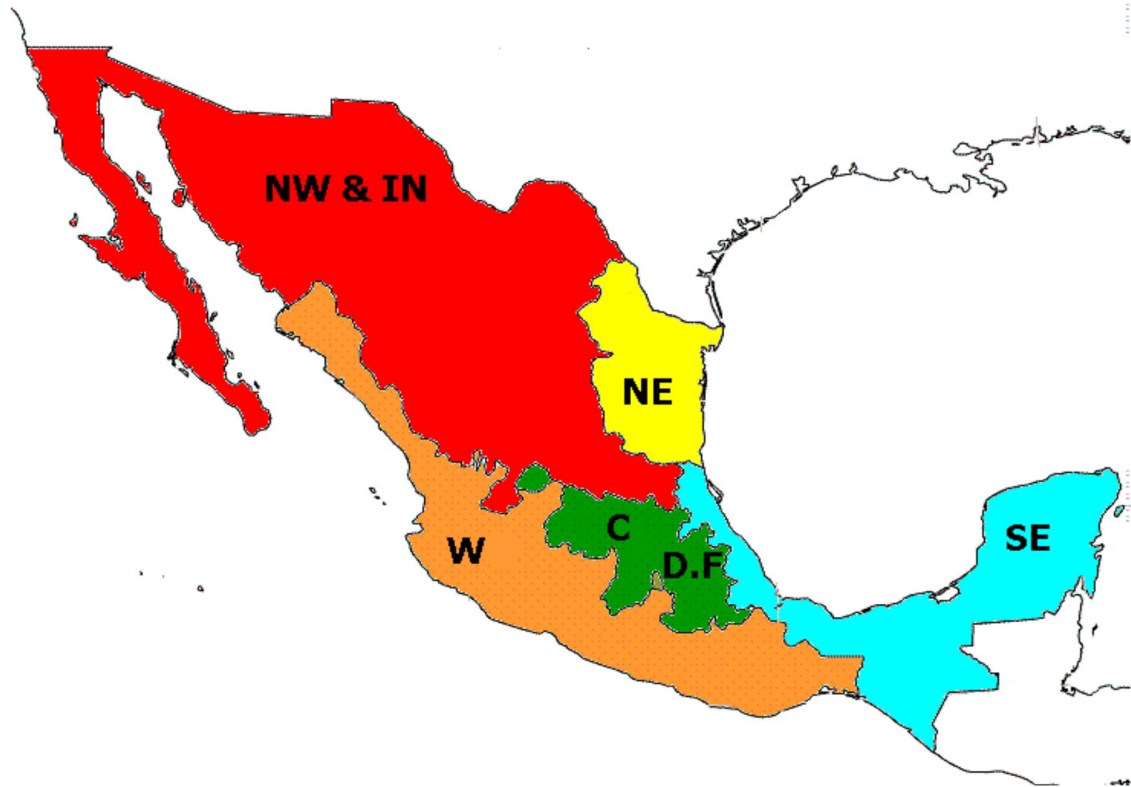
La ecuación anterior estima la generación de biogás usando cantidades de residuos dispuestos acumulados a través de un año. Proyecciones para años múltiples son desarrolladas variando la proyección del anual y luego iterando la ecuación. La generación de biogás total es igual a dos veces la generación de metano calculada. La función de degradación exponencial asume que la generación de biogás esta a su máximo un período antes que la generación de metano. El modelo asume un período de seis meses entre la colocación de los residuos y la generación de biogás. Por cada unidad de residuos, después de seis meses el Modelo asume que la generación de biogás desciende exponencialmente conforme la fracción orgánica de los residuos es consumida. El año de generación máxima normalmente ocurre en el año de clausura o el año siguiente (dependiendo del índice de disposición en los años finales).



El Modelo estima la generación y recuperación de biogás en metros cúbicos por hora ( $m^3/hr$ ) y en pies cúbicos por minuto ( $pies^3/min$ ). También estima el contenido de energía del biogás recuperado en millones de unidades térmicas británicas por hora (mmBtu/hr), La eficiencia de captura, la capacidad máxima de la planta de energía en megavatios (MW), y las toneladas de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente.

La composición del biogás asumida por el Modelo es de 50 por ciento Metano (CH<sub>4</sub>) y 50 por ciento otros gases, que incluyen dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y trazas de otros compuestos.

El Modelo puede calcular los índices de disposición anual usando la información alimentada por el usuario o el usuario puede alimentar los índices año con año en la hoja %Disposición y Recuperación de Biogás.+ El Modelo automáticamente asigna los valores de k y L<sub>0</sub> basándose en la información de clima y caracterización de residuos. Los valores de k varían dependiendo del clima y el grupo de residuos. Los valores de L<sub>0</sub> varían dependiendo del grupo de residuos. El clima esta categorizado en cinco regiones basándose en la precipitación anual promedio y la temperatura (ver Figura 4). Cada estado está asignado a una de las cinco regiones. Los tipos de residuos están categorizados en cinco grupos distintos, incluyendo entre ellos 4 grupos orgánicos y uno inorgánico. Si existiesen datos específicos del sitio, el usuario podrá alimentar esta información en la hoja %Caracterización de Residuos+. Si no existe información específica el Modelo asignara valores dependiendo del estado seleccionado. Estos valores están basados en datos de caracterización de residuos colectados de los estados en la región en cuestión.



**Figura 4. Regiones Climáticas de México**

Los índices de disposición anual, los valores de k y L0, los factores de corrección de metano y ajuste por incendio y estimaciones de la eficiencia de captura son usados para estimar la generación y recuperación de biogás para rellenos sanitarios en cada uno de los estados de México. Los resultados son presentados en forma de tabulación en la hoja %Resultados-Tabla+ y gráfica en la hoja %Resultados-Gráfica+.

La USEPA reconoce que es difícil modelar la generación y recuperación de biogás en forma exacta debido a las limitaciones en la información disponible para alimentar el modelo. Sin embargo, con la construcción y operación de nuevos rellenos sanitarios, y la disponibilidad de nueva información, el modelo presentado podrá ser mejorado. Además con la instalación de sistemas de captura en rellenos sanitarios de mayor información de recuperación estará disponible para la calibración y desarrollo de valores de las variables mejorados.



### DESCRIPCIÓN DEL MODELO

#### Generalidades en el Modelo Mexicano de Biogás Versión 1.0

La primer versión del Modelo Mexicano de Biogás (Versión 1.0) fue presentada en diciembre de 2003 y fue desarrollada por SCS Engineers para SEDESOL, IIE and CONAE bajo un acuerdo con el programa LMOP de USEPA y USAID. Este modelo aplicaba un solo valor de  $k$  y  $L_0$  en la ecuación LandGEM y eran asignados en base a la precipitación promedio anual de la ubicación del relleno sanitario. Los valores de  $k$  fueron estimados basándose en modelos preparado para dos rellenos sanitarios de México y observaciones generales en rellenos sanitarios de EEUU considerando la variación de la precipitación. Los valores de  $L_0$  fueron asignados en base a la caracterización de residuos promedio en México, derivada de información de 31 ciudades.

En el 2008, LMOP contrato a SCS Engineers para el desarrollo de una actualización y mejoramiento de esta versión del Modelo. Las siguientes limitaciones del modelo original fueron foco de esta revisión incluyeron:

“ El modelo asumía una caracterización de residuos promedio para todo México y no tomaba en cuenta las variaciones específicas por estado, o permitía que el usuario usará datos específicos en caso de que estuvieran disponibles. Las variaciones de la caracterización de residuos tiene un impacto muy grande en la generación de biogás. Un ejemplo claro es la Ciudad de México que tiene un contenido orgánico significativamente menor.

“ El uso de un solo valor de  $k$  en la ecuación LandGEM asume un solo índice de degradación para todos los tipos de residuos en el relleno sanitario y no toma en cuenta las variaciones del índice de degradación a través del tiempo. Esto resulta en errores significativos cuando el mayor porcentaje de residuos consiste de comida y otros residuos de degradación rápida. En México y otros países en vías de desarrollo con un contenido alto de residuos alimenticios, modelos de una sola  $k$  tienden a sobrestimar la generación de biogás en climas húmedos después de que el relleno sanitario cierra y subestimar la generación de biogás en climas secos mientras el relleno sanitario recibe residuos.

“ Los valores de  $k$  fueron basados en una cantidad de información limitada de dos rellenos sanitarios (El Relleno Sanitario de Simeprode en Monterrey era el único sitio con datos de flujo).

- " El Modelo usa una versión obsoleta de la ecuación de LandGEM.
- " El Modelo no incluye estimaciones de reducción de emisiones certificadas (CERs).
- " El Modelo requiere que el usuario alimente información detallada de los índices de disposición y evalúe la eficiencia de captura.

### **Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0**

El Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 (marzo 2009) provee una herramienta de estimación automatizada para cuantificar la generación y recuperación de biogás en rellenos sanitarios en todos los estados de México. El modelo aplica ecuaciones separadas para calcular la generación de cada uno de los cuatro grupos de residuos orgánicos agrupados de acuerdo a su índice de degradación:

- Residuos de degradación muy rápida . residuos alimenticios, otros orgánicos, 20% de los pañales.
- Residuos degradación moderadamente rápida . residuos vegetales, poda de casas parques municipales, papel higiénico.
- Residuos degradación moderadamente lenta . papel, cartón, textiles.
- Residuos degradación muy lenta . madera, caucho. piel, huesos, paja.

La generación de biogás total para todos los residuos es calculada como la suma de las cantidades de generación de biogás de cada una de las cuatro categorías de residuos. Cada una de las categorías tiene asignados un valor de  $k$  y  $L_0$  que son usados en el cálculo. Los cálculos del Modelo también incluyen ajustes que toman en cuenta la descomposición aeróbica de los residuos conocido como el factor de corrección de metano (MCF), y un ajuste que toma en cuenta si el sitio ha sido impactado por incendios. La recuperación de biogás es estimada por el Modelo multiplicando la generación de biogás proyectada por la eficiencia de captura. Cada una de estas variables .  $k$ ,  $L_0$ , MCF, ajuste de impacto por incendios y la eficiencia de captura . son discutidos en detalle en las siguientes secciones.

### **Índice de generación de Metano ( $k$ ).**

El índice de generación de metano,  $k$ , determina el índice de generación de metano producido por la degradación de los desechos en el relleno sanitario. Las

## ALLES Y METODOS

unidades de k son en año. El valor de k describe el índice al cual los residuos dispuestos en el relleno sanitario se degradan y producen metano, y está relacionado con el período de vida de los residuos de acuerdo con la ecuación:  $\text{período} = \ln(2)/k$ . Conforme el valor de k incrementa, la generación de metano en un relleno sanitario también incrementa (siempre y cuando el relleno sanitario siga recibiendo residuos) y luego disminuye con el tiempo .

El valor de k está en función de los siguientes factores: (1) contenido de humedad en los residuos, (2) la disponibilidad de nutrientes para las bacterias generadoras de metano, (3) pH, y (4) temperatura. Las condiciones de humedad dentro del relleno sanitario generalmente son difíciles de determinar por lo que son estimadas en base a la precipitación promedio anual. La disponibilidad de nutrientes está en función de las cantidades de residuos y la caracterización de los mismos. El pH dentro del relleno sanitario es desconocido y no es evaluado en el Modelo. La temperatura en el relleno sanitario es relativamente constante debido al calor generado por las bacterias anaeróbicas y tiende a ser independiente de la temperatura ambiente, excepto en rellenos sanitarios poco profundos en climas muy fríos. Por lo que los valores de k están basados en el tipo de residuo y clima.

Se han asignado valores de k para las cuatro categorías listadas anteriormente, estos valores reflejan los diferentes índices de degradación. Los valores de k asignados a cada una de las cuatro categorías también varían en base a la precipitación promedio anual en el clima de la región donde está ubicado el relleno sanitario. Cada estado está asignado a una de las 5 regiones climáticas mostradas en la Figura 4 basándose en la precipitación promedio anual. Los valores que usa el modelo para cada categoría de residuos se presentan en la Tabla 5.

Categoría de Residuos	Región 1	Región 2	Región 3	Región 4	Región 5
	Sureste	Oeste	Centro/Interior*	Noreste	Noroeste & Interior Norte
1	0.300	0.220	0.160	0.150	0.100
2	0.130	0.100	0.075	0.070	0.050
3	0.050	0.040	0.032	0.030	0.020
4	0.025	0.020	0.016	0.015	0.010

**Tabla 5: Valores del Índice de Generación de Metano (k)**

### Caracterización de Residuos y Generación Potencial de Metano (L0)

El valor de la generación potencial de metano (L0) de los residuos describe la cantidad total de gas metano potencialmente producida por una tonelada de residuos cuando esta se degrada y depende casi exclusivamente de la caracterización de los residuos en el relleno sanitario. A un contenido mayor de celulosa le corresponde un valor mayor de L0. Las unidades de L0 están en metros cúbicos por tonelada de residuos ( $m^3/Mg$ ). Los valores teóricos de L0 varían entre 6.2 y 270  $m^3/Mg$  de residuos (EPA, 1991).

Los valores de L0 usados por el Modelo están derivados de la caracterización de residuos de 40 ciudades (incluyendo 3 rellenos sanitarios en la Ciudad de México) que representan 18 estados y el Distrito Federal. El promedio de la caracterización de los residuos fue calculado para cada estado en cada región. Se utilizó la población para ponderar estos promedios. Para los estados donde no se contaba con información se les asignó la caracterización de residuos promedio de la región a la que pertenecen. Valores predeterminados para cada estado son usados por el modelo al menos que se indique que existe información específica del sitio en la hoja %Alimentación+ y se alimenta la información en la hoja %Caracterización de Residuos+

El modelo usa valores predeterminados para cada estado o datos de caracterización de residuos del sitio para calcular los valores en cada una de las cuatro categorías. Los valores de L0 utilizados por el Modelo se muestran en la Tabla 6. Se asume que los valores de L0 para cada grupo se mantienen constantes para todos los climas, excepto por la Categoría 2 en la que tiene una variación con el clima debido a las diferencias en el tipo de vegetación local.

(Categoría de Residuos)	Región 1	Región 2	Región 3	Región 4	Región 5
	Sureste	Oeste	Centro/Interior*	Noreste	Noroeste & Interior Norte
1	69	69	69	69	69
2	115	126	138	138	149
3	214	214	214	214	214
4	202	202	202	202	202

Tabla 6: Valores de la Generación Potencial de Metano (L0)

**Factor de Corrección de Metano ( MCF ).**

El factor de corrección de metano es un ajuste de la estimación de la generación de biogás en el Modelo que toma en cuenta el grado de degradación anaeróbica de los residuos. El MCF varia dependiendo de la profundidad de los residuos y el tipo de relleno sanitario como lo definen las practicas de manejo. En sitios con manejo, se asume que la degradación es anaeróbica en los residuos (MCF of 1). En sitios con condiciones menos apropiadas para degradación anaeróbica, el MCF será menor para reflejar las condiciones aeróbicas del sitio. La Tabla 7 resume los valores de MCF aplicados por el modelo basados en las respuestas proveídas en por el usuario en las preguntas #11 y #12 en la hoja Alimentación+referentes a la profundidad de residuos y prácticas de manejo del sitio.

Manejo del Sitio	Profundidad <5m	Profundidad >=5m
Sin Manejo	0.4	0.8
Con Manejo	0.8	1.0
Semi-aeróbico	0.4	0.5
Condición Desconocida	0.4	0.8

**Tabla 7: Factor de Corrección de Metano (MCF)**

Profundidad de residuos mayores a 5 metros promueve la degradación anaeróbica, en sitios menos profundos la degradación de los residuos es principalmente aeróbica. Un sitio con manejo está definido como un sitio que cuenta con la colocación controlada de los residuos (los residuos son dirigidos a areas de disposición especifica, tienen un control del pepenado e incendios) y una o más de las siguientes condiciones: material de cobertura, compactación mecánica, o conformación de residuos (IPCC, 2006). Un sitio semi-aeróbico tiene colocación controlada de los residuos y todas las siguientes condiciones que pudieran introducir aire en los residuos: material de cobertura permeable, sistema de drenaje de lixiviado, y sistema de venteo de biogás (IPCC, 2006).

**Ajustes por Impacto de Incendios ( F ).**

Incendios en rellenos sanitarios consumen residuos usándolos como combustible y dejando cenizas, las cuales que no producen biogás. La generación de biogás puede ser significativamente impactada en rellenos sanitarios que han experimentado incendios. El usuario tendrá que responder en la pregunta 13a en

la hoja de Alimentación+ si el sitio ha sido impactado por incendios. Si la respuesta es Si+ El usuario tendrá que responder a una pregunta adicional estableciendo el área de residuos impactada por los incendios. El Modelo descuenta de la generación de biogás el porcentaje del área impactada multiplicado por el ajuste por la severidad del impacto (1/3 para impacto bajo, 2/3 para impacto medio, y 1 para impacto severo).

### **Estimación de la Eficiencia de Captura y Recuperación de Biogás**

La eficiencia de captura es una medida de la habilidad del sistema de captura para recuperar el biogás generado. Está en función del diseño del sistema (cuanta área del relleno sanitario está cubierta por el sistema de captura) y la operación y mantenimiento de sistema (que tan eficientemente es operado y mantenido). La eficiencia de captura es un porcentaje aplicado por el Modelo a la generación de biogás para estimar la cantidad de biogás que puede ser recuperado para combustión o uso benéfico. A pesar de que la recuperación de biogás puede ser medida, los índices de generación de un relleno sanitario no pueden ser medidos (por esto se necesita el modelo para estimar la generación); por lo tanto existe una incertidumbre considerable en la eficiencia de captura actual lograda en rellenos sanitarios.

En respuesta de la incertidumbre en la eficiencia de captura, la USEPA publicó que es reconocido que existen eficiencias de captura razonables para rellenos sanitarios en EEUU que cumplen con estándares de diseño y tienen sistemas de captura completos (USEPA, 1998). De acuerdo con la USEPA, las eficiencias de captura típicas varían entre 60% a 85%, con un promedio de 75%. Más recientemente, un reporte del Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC, 2006) estableció que una recuperación >90% puede ser lograda en celdas con cobertura final y un sistema de captura eficiente.+ Mientras los rellenos sanitarios en México pueden alcanzar eficiencias de captura máximas de más de 90% bajo las mejores condiciones, sitios sin manejo nunca podrían alcanzar eficiencias de captura de 50% aun con un muy buen sistema de captura instalado.

El Modelo calcula la eficiencia de captura automáticamente basándose en las respuestas provistas por el usuario en la hoja de Alimentación.+ Alternativamente,



el Usuario podrá alimentar manualmente las eficiencias de captura si así lo desea. Es recomendable que el usuario use el cálculo automático al menos que el sitio ya cuente con un sistema de captura en operación y existen datos de flujo. El proceso para ajustar manualmente la eficiencia de captura para que los índices de recuperación de biogás puedan coincidir .

### **Calculo de la Eficiencia de Captura .**

El Modelo calcula automáticamente la eficiencia de captura basado en los siguientes factores:

- " Cobertura del sistema de captura . la eficiencia de captura está directamente relacionada con la extensión del sistema de pozos en la masa de los residuos.
- " Profundidad de los residuos . rellenos sanitarios con profundidades someras requiere pozos que son menos eficientes y más propensos a la infiltración de aire.
- " Tipo de cobertura y extensión . las eficiencias de captura serán más altas para rellenos sanitarios con material de cobertura menos permeables sobre áreas con residuos, cobertura poco permeables limitan las emisiones de biogás a la atmosfera, la infiltración de aire en el sistema de captura y la infiltración de lluvia en los residuos.
- " Recubrimiento inferior . los rellenos sanitarios con recubrimiento inferior de arcilla o sintético tendrán baja incidencia de migración de biogás en los suelos aledaños, resultando en una eficiencia de captura mayor.
- " Compactación de residuos . residuos sin compactar tendrán una infiltración mayor de aire y una calidad de biogás menor, y por lo tanto una eficiencia de captura menor.
- " Tamaño de área de disposición activa . sitios sin manejo con áreas de disposición grandes tienden a tener eficiencias de captura menores que sitios con manejo donde la disposición es dirigida a un área específica.
- " Manejo de lixiviados . Niveles de lixiviados altos pueden limitar dramáticamente las eficiencias de captura, particularmente en rellenos con alta precipitación, drenaje pobre y cobertura limitada.

Cada uno de estos factores será discutido . Mientras se responda a las preguntas en la hoja de Alimentación+ el usuario deberá comprender las condiciones que afectan la eficiencia de captura pueden cambiar con el tiempo conforme las

condiciones del relleno sanitario cambian. Por ejemplo, la profundidad de los residuos o el porcentaje de área con cobertura final. Se recomienda que el usuario conteste las preguntas reflejando las condiciones actuales si el sistema de captura ya está instalado. Si el sistema no ha sido instalado, el usuario deberá tratar de estimar la condiciones futuras para el año en que se estima el sistema estará en operación. De esta manera la eficiencia de captura calculada reflejara las condiciones actuales o del primer año de operación del sistema. Ajustes a años futuros podrán ser estimados usando datos de recuperación actual usando el proceso descrito .

### **Cobertura del Sistema de Captura**

La cobertura del sistema de captura describe el porcentaje de los residuos que están bajo la influencia de los pozos de extracción existentes o planeados. La cobertura del sistema toma en cuenta el diseño del sistema y la eficiencia de las operaciones del campo de pozos. La mayoría de los rellenos sanitarios, particularmente aquellos que siguen en operación, tendrán una cobertura del sistema menor de 100 por ciento. Sitios con problemas de seguridad o áreas con residuos sin control de pepenadores no podrán instalar equipo en áreas inseguras y no podrán lograr buena cobertura de sistema de captura.

El usuario deberá estimar la cobertura del sistema de captura presente o futura en la pregunta #15 de la hoja de **%Alimentación+**, la cual pregunta por el porcentaje del área con pozos de extracción. Las estimaciones de la cobertura del sistema en rellenos sanitarios con un sistema ya instalado deberán tomar en cuenta pozos que no estén operación. La importancia de los pozos que no están operando deberá tomar en cuenta cuando se estime el descuento por los pozos que no estén en operación. Por ejemplo, un sitio con un pozo sin funcionar en la proximidad de otros pozos en funcionamiento deberán causar menos descuento que un pozo sin funcionar en un área del relleno sanitario donde no hay otros pozos en funcionamiento.

La evaluación de la cobertura del sistema de captura requiere familiaridad con el diseño del sistema. El espaciamiento y profundidad de los pozos son factores importantes. La siguiente lista describe varios escenarios que se deben considerar:

“ Pozos con mayor profundidad pueden tener un radio de influencia mayor y por consecuencia acción en un volumen mayor de residuos a su alrededor que



pozos menos profundos. Pozos profundos también permiten la aplicación de mayor succión sin que se presente infiltración de aire en el sistema a través del material de cobertura.

“ Rellenos sanitarios con pozos profundos (más de 20 metros) pueden eficientemente capturar biogás si se colocan en una densidad menor a dos pozos por hectárea.

“ Rellenos sanitarios con pozos menos profundos requieren densidades mayores a dos pozos por hectárea dependiendo de su profundidad.

A pesar de que los relleno sanitarios con una densa red de pozos pueden capturar más biogás, rellenos sanitarios con menor número de pozos espaciados apropiadamente capturan más biogás por pozo (debido a la disponibilidad de biogás y la influencia que tiene el pozo en los residuos) que rellenos sanitarios con una densidad mayor de pozos.

### **Profundidad de los Residuos**

con profundidades más grandes permiten que se instalen pozos con mayor profundidad. Como se señaló en la discusión anterior sobre la cobertura del sistema de captura, pozos más profundos pueden operar con más eficacia que los pozos menos profundos debido a que un mayor vacío se puede aplicar los pozos. Los pozos instalados en residuos con una profundidad menor a 10 m tenderán a tener una mayor infiltración de aire. Los usuarios del modelo deberán alimentar la profundidad media del relleno sanitario en la pregunta #11 de la hoja de Alimentación+. El modelo asume un descuento del 5% a las estimaciones de eficiencia del sistema de captura por cada metro de residuos que sean de una profundidad de menos de 10m.

### **Tipo y Área de la Cobertura**

El tipo de cobertura y el área con cobertura pueden tener una influencia significativa en la eficiencia de captura que se pueda alcanzar. Sitios de disposición sin manejo que tengan poca o ninguna cobertura de tierra tendrán altas tasas de emisiones de biogás a la atmosfera y de infiltración de aire al sistema de captura, lo que resulta en menores tasas de captura de biogás. Zonas sin cobertura de tierra también tendrán altas tasas de infiltración de lluvia,

causando que aumenten los niveles de lixiviado que a la vez causa estragos en el sistema de captura de biogás. La instalación de una cobertura de tierra disminuirá las emisiones de biogás a la atmosfera y la infiltración de aire y lluvia. Estos efectos dependerán de la permeabilidad y espesor de la cobertura, y del porcentaje de área del relleno sanitario sin cobertura. Usualmente, la cobertura final tendrá el mayor espesor y la menor permeabilidad posibles y será la más eficaz en términos de aumentar la eficiencia de captura. La mayoría de los rellenos sanitarios tienen por lo menos una cobertura de tierra intermedia instalada en área que no se han utilizado para disposición de residuos por un período prolongado.

Esta cobertura intermedia provee un nivel de control moderado sobre la infiltración de aire, las emisiones de biogás y la infiltración de lluvia. Coberturas de tierra diarias es generalmente una capa de tierra somera que se instala al final del día en las zonas de disposición activa y proporciona una barrera más permeable al aire y al agua que las cubiertas finales o intermedias.

El usuario deberá estimar el porcentaje de área del relleno sanitario con cada tipo de cobertura de tierra en las preguntas #16, 17 y 18 de la hoja de %Alimentación+. El Modelo calcula automáticamente el porcentaje de área del relleno sin cobertura de tierra como el área restante. El modelo calcula un ajuste ponderado de la eficiencia de captura media para tener en cuenta los porcentajes de cada tipo de cobertura de tierra mediante la asignación de eficiencia de captura de 90% al porcentaje de área del relleno con cubierta final, eficiencia de captura de 80% al porcentaje de área del relleno con cubierta intermedia, eficiencia de captura de 75% al porcentaje de área del relleno con cubierta de tierra diaria y eficiencia de captura de 50% al porcentaje de área de relleno sin ninguna cubierta.

### **Recubrimiento Inferior**

Recubrimientos sintéticos o de arcilla actúan como una barrera de baja permeabilidad, que es eficaz en limitar la migración de biogás fuera del sitio a aéreas circundantes, en particular cuando hay un sistema de captura de biogás en funcionamiento. El usuario deberá estimar el porcentaje de área del relleno con un recubrimiento sintético o de arcilla en la pregunta #20 de la hoja de %Alimentación+.

El Modelo calcula un descuento a la eficiencia de captura igual a 5% multiplicado por el porcentaje de área sin recubrimiento sintético o de arcilla.

### **Compactación de los Residuos**

La compactación de los residuos ayuda a promover la descomposición anaeróbica de los residuos y tiende a mejorar la eficiencia de captura ya que limita la infiltración de aire y mejora la calidad del gas. Los usuarios de modelo deberán contestar en la pregunta #21 de la hoja de %Alimentación+ si la compactación de los residuos ocurre de forma regular. La eficiencia de captura se descuenta un 3% si no hay compactación habitual de los residuos.

### **Área de Disposición**

En los rellenos sanitarios donde los camiones de entrega de residuos son dirigidos a descargar los residuos en un área específica proporcionaran un mejor manejo de los residuos dispuestos, incluyendo compactación más eficiente, cobertura de los residuos expuestos más frecuente y extensa, y profundidades mayores de los residuos. Todo esto contribuye a eficiencias de captura mayores. El usuario deberá contestar si los residuos son descargados en un área específica en la pregunta #22 de la hoja de %Alimentación+. La eficiencia de captura se descuenta un 5% si los residuos no se disponen en un área específica.

### **Lixiviados**

Los lixiviados casi siempre limitan las operaciones eficientes del sistema de captura en los países en vía de desarrollo debido al alto contenido de humedad en los residuos y a la falta de un drenaje adecuado. Las zonas con fuertes lluvias son especialmente susceptibles a la acumulación de lixiviados en el relleno sanitario. Niveles altos de lixiviados en un relleno sanitario pueden limitar drásticamente la eficiencia de captura bloqueando las perforaciones de los pozos y previniendo que los pozos apliquen vacío para extraer el biogás de la masa circundante de residuos. Salvo que el clima sea extremadamente seco o el relleno sanitario haya sido diseñado para ofrecer un buen manejo de los líquidos a través de un drenaje adecuado en la superficie y sistemas costo-efectivos de captura y tratamiento de

lixiviados, el relleno sanitario a menudo mostrara señales de acumulación de líquidos a través de brotes o afloramientos de lixiviados en la superficie o en los taludes. Esta evidencia de niveles altos de lixiviados en el relleno sanitario pueden ser características temporales que solo aparecen después de lluvias, lo que sugiere que el problema de lixiviados puede ser menos grave, o pueden persistir durante periodos más largos, lo que sugiere que los altos niveles de lixiviados son un problema constante.

Los impactos de los lixiviados en la eficiencia de captura son evaluados en el modelo basado en la evidencia de lixiviados en la superficie del relleno, ya sea que la evidencia aparezca después de lluvias y en el clima. El usuario deberá contestar si en la superficie existen afloramientos o brotes de lixiviado en la pregunta #23a de la hoja de %Alimentación+. Si la respuesta es afirmativa, el usuario deberá contestar en la pregunta #23b si eso solo ocurre después de llover. Si hay evidencia de acumulación de lixiviados solo aparece después de llover, el Modelo aplica un descuento de 2% a 15% a la eficiencia de captura dependiendo del clima (climas lluviosos reciben un descuento más alto). Si la evidencia de acumulación de lixiviados persiste o continua después de llover, el modelo aplica un descuento de 10% a 40% a la eficiencia de captura dependiendo del clima.

### **Estimación de la Eficiencia de Captura**

El modelo calcula la eficiencia de captura como el producto de todos los factores enumerados anteriormente. Si el factor de eficiencia de captura tiene un descuento, un valor de uno menos el descuento se utiliza en el cálculo. Cada paso en el cálculo de la eficiencia de captura y el resultado estimado de la eficiencia de captura se muestran en las celdas J15 a J22 de la hoja de %Disposición y Recuperación de Biogás+. El valor de la eficiencia de captura calculada también se muestra en la columna D de la hoja de %Disposición y Recuperación de Biogás+ para cada año comenzando con el primer año de puesta en marcha el sistema de captura que fue indicado por el usuario en la respuesta de la pregunta #14 de la hoja de %Alimentación+.

### Ajustes por Eficiencia de Captura

Estimaciones precisas de la eficiencia de captura pueden ser difíciles de lograr, debido a todos los factores de influencia descritos anteriormente. La precisión de la estimación tiende a ser mayor cuando la eficiencia de captura es alta y menor cuando la eficiencia de captura es baja. Esto se debe a que es más fácil determinar que el diseño y las operaciones del sistema de captura se están optimizando, que es estimar la cantidad de descuento que debe ser aplicado al estimado de la eficiencia de captura cuando hay múltiples factores creando condiciones no óptimas para la extracción de biogás. El Modelo está destinado para ser utilizado por personas que no están familiarizados o entrenados en métodos de evaluación de la eficiencia de captura. Por esta razón, recomendamos que los cálculos de la eficiencia de captura del Modelo se dejen intactos para la mayoría de las aplicaciones. La única excepción es para la modelación de sitios con sistemas de captura de biogás instalados y con información de flujo actual disponible para realizar una comparación de los estimados de la recuperación del Modelo.

Si la información del flujo incluye tanto los flujos de biogás y el contenido de metano del biogás, e incluye un largo período de tiempo del funcionamiento del sistema (lo suficiente para representar la recuperación media por un año), se recomienda ajustar las estimaciones de la eficiencia de captura. Los datos actuales de recuperación de biogás deben ajustarse al 50% de metano equivalente (calculando los flujos de metano y multiplicando por 2) y, a continuación, calcular el promedio sobre una base anual. El estimado resultante de recuperación actual de biogás debe ser alimentado en la correspondiente fila de la Columna E de la hoja de **%Disposición y Recuperación de Biogás+**. Los estimados de eficiencia de captura en la Columna D de la hoja de **%Disposición y Recuperación de Biogás+** pueden ajustarse de manera que las tasas de recuperación proyectada de biogás que se indican en la columna F se asemejen a las tasas actuales de recuperación de biogás.

A continuación se describe los valores que son considerados de la hoja de alimentación para el Relleno Sanitario de la zona conurbada del sur de Tamaulipas:

- 1.- Factor de corrección de metano (MCF); para un sitio con manejo y una profundidad mayor o igual a 5 metros:  $MCF=1.0$  (Región Noreste)
- 2.- Para residuos con porcentaje de degradación muy rápida, Región Noreste:  $Lo = 69$
- 3.- Para residuos con porcentaje de degradación muy rápida, Región Noreste:  $K = 0.150$

### **II.4.- Análisis de Pre - factibilidad**

#### **METODOLOGÍA**

Consideraciones mínimas para el análisis del pre proyecto de un relleno sanitario.  
Estudio de pre factibilidad.

#### 1.- Energéticas y ambientales

- Cantidad y cantidad de residuos sólidos depositados
- Humedad
- Clima
- Antigüedad del sitio de disposición
- Espesor de las celdas de los residuos sólidos confinados
- Precios de energéticos, hábitos de consumo y legislación de calidad ambiental

#### 2.- Económicas financieras

- Competencia de canasta de proyectos y políticas de apoyo financiero
- Situación política y socioeconómica
- Percepción del capital para invertir en estos proyectos

#### 3.- Sociales y políticas

- Recicladores en el sitio de disposición final
- Aceptación de la comunidad ante la aceptación del proyecto
- Aceptación de las autoridades para llevar a cabo la instrumentación del proyecto

#### 4.- Legales

- Explotación, estructura de precios, legislación sobre energías alternativas y distribución de combustibles

Estudio de factibilidad.

1.- Oferta de biogás

- Pruebas de producción de biogás

2.- Demanda de biogás

- Uso de energéticos e idiosincrasia de los consumidores
- Costos de producción y normatividad sobre la calidad de los energéticos

3.- Financiamiento

- Fuentes de financiamiento y modelación financiera
- Marco legal

4.- Estructura del negocio

- Estructura organizacional
- Asociaciones y contactos empresariales, nacionales e internacionales

### **Descripción del proceso para la generación del biogás para producción de energía eléctrica en el relleno sanitario de la zona sur de Tamaulipas:**

La materia orgánica constituyente de los residuos urbanos es transformada en los rellenos sanitarios por bacterias facultativas y anaerobias mediante una serie de reacciones que dan por resultado una mezcla gaseosa comúnmente conocida como biogás, compuesta básicamente por metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), vapor de agua y otros.

La fermentación anaeróbica involucra a microorganismos de distintos tipos, los cuales pueden ser divididos en tres grandes grupos principales. La producción real de metano es la última parte del proceso y no ocurre si no han actuado los primeros dos grupos de microorganismos.

Las bacterias productoras del biogás son estrictamente anaeróbicas y por lo tanto sólo actúan en ausencia total de oxígeno atmosférico. Otra característica que las identifica es la sensibilidad a los cambios ambientales.

Las dificultades en el manejo de estas delicadas bacterias explican que la investigación sistemática tanto de su morfología como de la bioquímica fisiológica sólo se halla iniciado hace cincuenta años. Hoy en día gracias a estudios muy



recientes podemos conocer mejor el mecanismo y funcionamiento de la descomposición de la materia orgánica que la reduce a sus componentes básicos metano y bióxido de carbono.

**Materia orgánica + bacterias anaerobias = CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + CH<sub>4</sub> + NH<sub>3</sub>.**

El proceso anterior no sólo tiene lugar en los rellenos sanitarios, sino también en los vertederos a cielo abierto, aunque en menor escala.

Los factores que influyen en la producción de biogás en un relleno sanitario pueden dividirse en dos: la composición de los residuos y los factores físicos ambientales.

Las características cualitativas y cuantitativas de los residuos sólidos depositados en un sitio de disposición final son muy variables. Estas dependen de la geografía, del nivel de vida de la población, de las actividades económicas de la región y de la estación del año, entre otros factores. Es fundamental conocer la composición que guarda el conjunto de residuos dispuestos en un relleno sanitario. Esto se puede lograr mediante muestreo de generación o muestreo in-situ, siendo los últimos los más adecuados pues reflejan la ausencia de aquellos materiales que han sido retirados durante el manejo de los desechos. Los residuos orgánicos de alimentos constituyen la fracción que se degrada con mayor facilidad y rapidez. La mayor proporción de estos materiales en la composición de los residuos estará directamente relacionada con la velocidad de generación del biogás. A mayor cantidad de comida presente en los residuos, más rápido se generará biogás. El papel y materias orgánicas similares se degradan a una tasa menor y se resisten a la biodegradación.

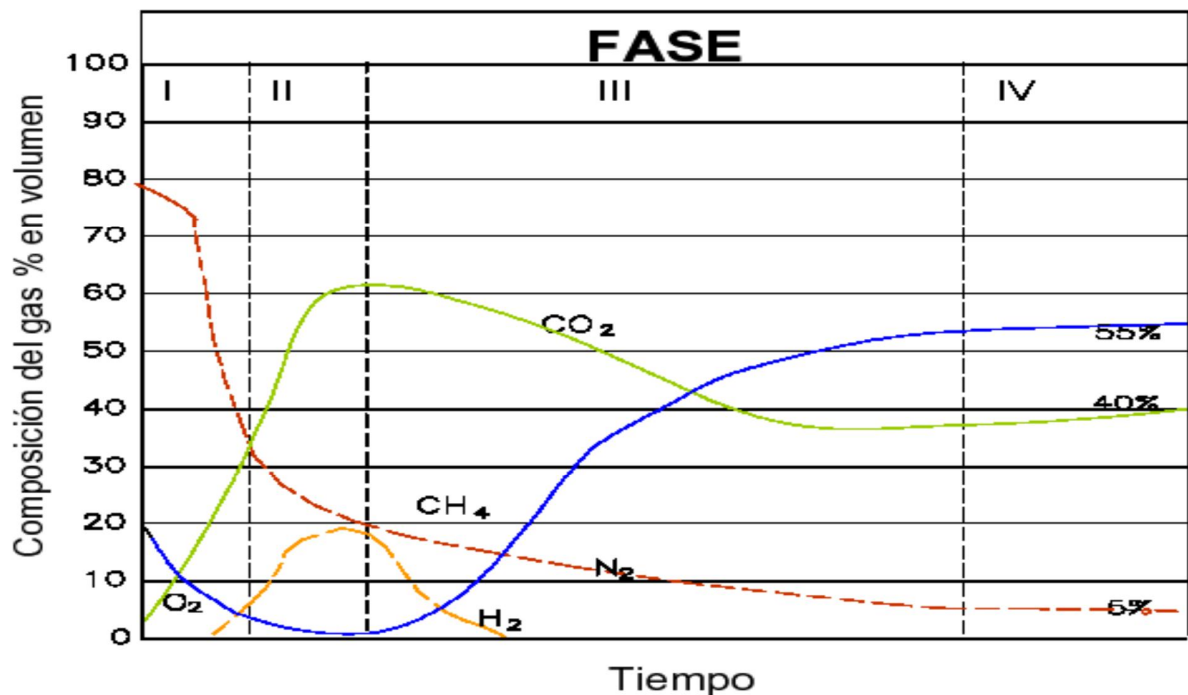
Los residuos depositados en los rellenos sanitarios en los países en desarrollo tienden a estabilizarse en un periodo de 10 a 15 años, ya que el alto contenido de material de rápida biodegradación se equilibra aceleradamente, en tanto que los rellenos con alto contenido de papel y cartón tardan 20 años o más, sin contar los plásticos.

La composición de los residuos es el factor más importante en la evaluación del potencial de generación de biogás de un sitio específico. El máximo volumen del biogás depende de la cantidad y contenido orgánico dentro de la masa de residuos (Environment Canadá, 1996) debido a que es precisamente la descomposición de los residuos orgánicos la fuente de todo el biogás que puede generar el relleno.



**Fase aeróbica:** Inicialmente, parte del material orgánico presente en los residuos es metabolizado aeróbicamente (mientras exista disponible oxígeno libre), produciéndose un fuerte aumento en la temperatura. Los productos que caracterizan esta etapa son el dióxido de carbono, agua, nitritos y nitratos

**Fase anaeróbica:** A medida que el oxígeno disponible se va agotando, los organismos facultativos y anaeróbicos empiezan a predominar y proceden con la descomposición de la materia orgánica, pero más lentamente que la primera etapa. Los productos que caracterizan esta etapa son el dióxido de carbono, ácidos orgánicos, nitrógeno, amoníaco, hidrógeno, metano, compuestos sulfurados (responsables del mal olor) y sulfitos de fierro, manganeso e hidrógeno. La biodegradación de los residuos sigue un patrón de cuatro etapas, ( Ver figura 5 ).



**Figura 5. Proceso de Degradación de la Fracción Orgánica**

**Etapa 1:** Esta etapa es aeróbica y comienza inmediatamente después que los residuos son depositados, durante la cual las sustancias de fácil biodegradación comienzan a degradarse a partir de su contacto con el oxígeno del aire. Este es un proceso de compostaje donde se produce bióxido de carbono y la temperatura comienza a elevarse. En general es una etapa relativamente corta.

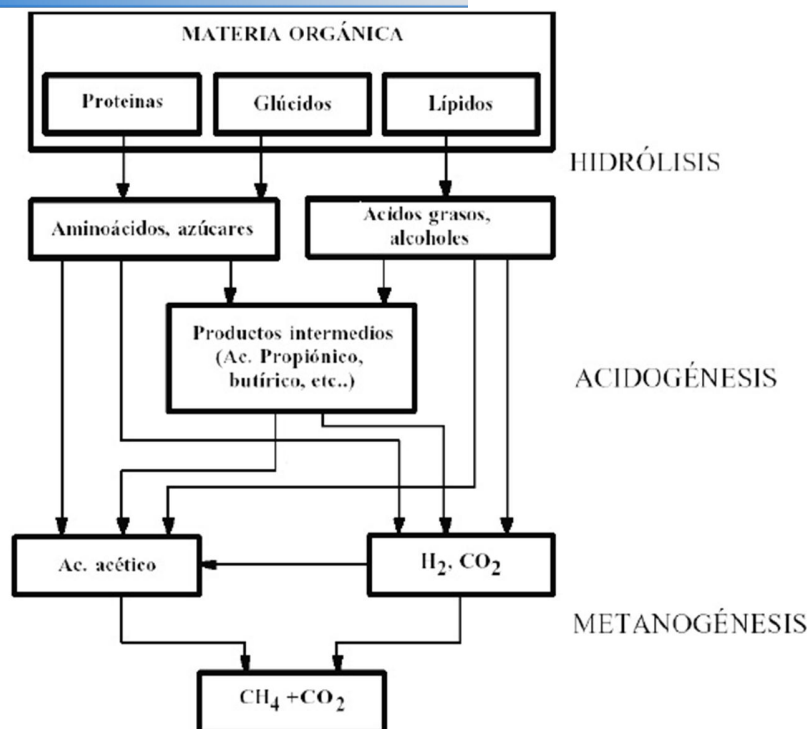
**Etapa 2:** Esta etapa también es una etapa aeróbica, durante la cual ocurre un proceso de fermentación, se desarrollan ácidos en los líquidos percolados y se produce una caída importante en el pH. En estas condiciones el biogás está compuesto básicamente de CO<sub>2</sub>.

**Etapa 3:** En esta etapa se han establecido condiciones anaeróbicas y la actividad microbiana desata condiciones metano génicas. El biogás empieza a tener cantidades crecientes de metano y la concentración de bióxido de carbono empieza a decrecer. En la medida que los ácidos orgánicos se convierten en biogás, el pH de los lixiviados comienza a aumentar, su carga orgánica a decrecer y el contenido de amoníaco a aumentar.

**Etapa 4:** Esta etapa es conocida como la fase de estabilidad metano génica. Es también la fase anaeróbica donde la producción de metano alcanza su más alto nivel, con una concentración de metano estable en el rango de 40% a 60% por volumen de biogás.

Los ácidos orgánicos en los lixiviados se descomponen inmediatamente en biogás. La carga orgánica de los lixiviados es baja y consiste principalmente de componentes orgánicos de alta bio degradabilidad. Como las condiciones son eminentemente anaeróbicas, los lixiviados tendrán una alta concentración de amoníaco.

Las etapas 1 y 2 pueden tener una duración de entre semanas a dos o más años. En general, una mayor temperatura ambiental tenderá a acelerar los procesos de biodegradación. Altas tasas de compactación y acumulación de los residuos en capas delgadas también tendrán el mismo efecto. La acumulación de los residuos en celdas pequeñas también acelerará las reacciones tendiendo a reducir la duración, ( Ver figura 6 ).



Fuente: Flotats X, Campos, E. Bonmatí. Universidad de Lleida

**Figura 6.- Etapas de Generación de Biogás**

**Producción de Energía a partir de fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos ( FORSU ) .**

Se puede usar FORSU para generar biogás que puede producir energía en distinta forma:

- ” **Calor y vapor:** pueden ser el producto principal en aplicaciones de calefacción y cocción, o puede ser un subproducto de la generación de electricidad en ciclos combinados de electricidad y vapor.
- ” **Combustible gaseoso:** El biogás producido puede ser utilizado en motores de combustión interna (MCI) para generación eléctrica, para la calefacción y acondicionamiento en el sector doméstico, comercial e institucional y en vehículos modificados.
- ” **Generación de electricidad:** La electricidad generada a partir de FORSU puede ser comercializada con el término moderno de **energía verde**, por considerarse en el grupo de energías renovables.

Para empezar, tenemos como dato mundial que un metro cubico de biogás totalmente en combustión es suficiente para:

- Generar 6 horas de luz equivalente a una lámpara incandescente de 60 watts.
- Poner a funcionar un refrigerador de 1 metro cubico de capacidad durante 1 hora.
- Hacer funcionar una incubadora de 1 metro cubico de capacidad durante 30 minutos.
- Hacer funcionar un motor de 1 hp durante dos horas.

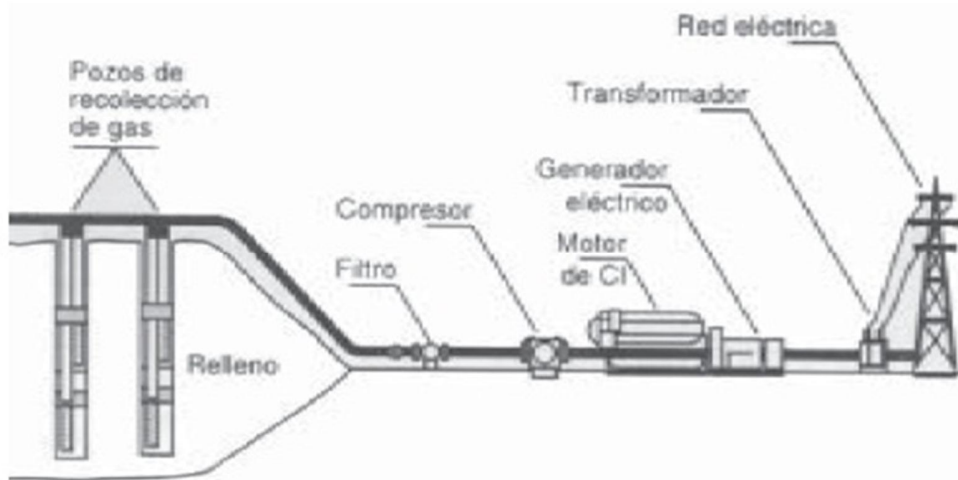
Lo anterior es particularmente importante si tomamos en cuenta, el déficit de energía presente en algunas regiones de México, ya que gran parte de la electricidad es generada a partir de combustibles no renovables, siendo la tendencia en el futuro próximo poco halagadora.

Además el biogás puede ser integrado en el sistema de distribución del gas natural, donde se posea.

A pequeña y mediana escala el biogás ha sido utilizado comúnmente para cocinar, por medio de combustión directa en estufas simples, y también en iluminación, para calefacción y en la actualidad como combustible en motores de combustión interna para generación de electricidad en remplazo de derivados del petróleo como la gasolina y el diesel.

La composición del biogás hace a éste un combustible con buenas características para ser utilizado en turbinas o máquinas de combustión interna que accionen generadores eléctricos. El proceso de la generación de energía en un Relleno Sanitario comienza con la extracción del biogás a través de pozos verticales perforados en toda la extensión del Relleno, ( Ver figura 7 ).

Mediante una red superficial de tuberías, el biogás es conducido hasta una estación donde se le quita la humedad y otras sustancias indeseables, como el  $H_2S$ . Este compuesto al reaccionar con agua se convierte en ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), que es altamente corrosivo y puede ocasionar graves daños en el sistema mecánico en los motores de combustión interna (MCI). Esto se realiza a través de un sistema de lavado de gases con sustancias como la cal viva, limaduras de hierro o ciertos tipos de tierras conocidas como hematites parada o limonita, ricas en sustancias ferrosas. Todas estas operaciones se realizan con el fin de purificar el biogás y tener una combustión limpia y eficiente.



**Figura 7. Esquema de generación de electricidad para el Relleno Sanitario en estudio**

En la producción del biogás se aprovecha éste para la alimentación de la energía eléctrica necesaria en la misma planta de producción y en el Relleno Sanitario de donde se extraerá, y otras opciones de utilización del biogás que se muestran en la Tabla 8.

Opción	Aplicación
Generación Eléctrica	Para utilización en líneas de distribución.
Combustión Directa	Cocinas, Iluminación
Calderas / Hornos	Para usos especiales
Refrigeración	Enfriamiento temporal

Tabla 8. Opciones de uso potencial del biogás

### Proceso de Desgasificación y Funcionamiento del Sistema

Se debe de tener particular cuidado en el manejo del biogás desde el Relleno Sanitario, la captación ha de ser regulada y controlada para evitar situaciones de peligro en su aprovechamiento. El aprovechamiento del biogás requiere su captación y su envío en las condiciones de presión, temperatura, composición y humedad necesarias para su utilización en grupos de Motor-Generador.

Para este aprovechamiento es necesario disponer de pozos de captación, perforaciones realizadas mediante sondas de material calibrado, tubería perforada de polietileno y material impermeabilizante, para conseguir un radio de influencia

máximo, de forma que se consiga captar la mayor cantidad de biogás, sin provocar la entrada de aire en el depósito.

La construcción y el funcionamiento de los pozos de captación depende del radio que posean debido a la depresión que se aplique a cada pozo, al sellado circundante y a la profundidad, que depende de la altura del residuo acumulado en los puntos de perforación y características de la masa a perforar.

La conducción del biogás producido y captado debe de realizarse mediante de tuberías, de polietileno de alta densidad, de pared ciega para evitar la entrada de aire. El espesor de éstas tuberías se tiende a sobredimensionar para aumentar el grado de seguridad de la instalación. Es común para éste tipo de instalaciones utilizar tubería PN6 (de presión de trabajo a 6 bares), aun cuando en la conducción o transporte del biogás se realice en milibares.

Cada pozo debe de conectarse a una única línea de conducción y cada línea se conecta a dos pozos; el extremo de ésta conexión va hacia las entradas de la estación de regulación y medida; esta estación es el elemento clave para la adecuada captación del biogás ya que en ella se habrán de tomar las muestras del gas conducido por cada una de las líneas, se deberá analizar y, en función de las características de este gas, se deberá ajustar la aspiración en cada línea.

El funcionamiento de la estación de regulación de captación de biogás se describe a continuación: cuando el biogás captado por el pozo tiene una concentración de CH<sub>4</sub> inferior a la deseada, se cierra parcialmente la válvula de regulación correspondiente, de forma que la depresión que se tienen en el pozo disminuye y hace que disminuya el caudal de biogás captado. En caso que el biogás captado tenga un porcentaje mayor al deseado, se aumenta la captación en el pozo.

En la estación de regulación se obtienen muestras y medidas del biogás capturado del cual se analiza la concentración de oxígeno en el gas con el fin de detectar posibles filtraciones de aire en el sellado o en las líneas de conducción.

La estación de regulación se conecta con la estación de extracción, en esta estación se disponen los soplantes que ponen en depresión a toda la red de captación de biogás y a su vez lo impulsa hacia el grupo Motor . Generador.

Para evitar cambios bruscos en el sistema de conducción del caudal de gas extraído hacia los grupos de generación y para asegurar la combustión correcta del biogás captado; se emplean dos sistemas simultáneamente:



- ~ **Un gasómetro**, en él se almacena el biogás, además de realizar la función de amortiguar las puntas de producción y puntas de consumo.
- ~ **Una antorcha**, que quema el exceso de biogás captado y que en dicho momento no puede ser consumido en los grupos generadores, ni almacenado en el gasómetro.

Es importante que la antorcha sea flexible en cuanto al caudal admitido y que permita su funcionamiento con un caudal muy bajo, pues al hacer la función de amortiguador en el caudal del gas debe de trabajar más rápidamente que el gasómetro. Si el caudal quemado en la antorcha se alarga durante un tiempo determinado, el sistema debe rebajar el caudal captado del vertedero, haciéndole trabajar parcialmente como un gasómetro.

Una vez captado y extraído el biogás de una forma controlada, se procede a su aprovechamiento en forma de combustible en el grupo Motor . Generador para la producción de energía eléctrica.

### **Equipos .**

Se puede entonces destacar dentro de las instalaciones de una planta de biogás en un vertedero los siguientes equipos:

**Red de Captación y Conducción:** unidades encargadas de la captación del biogás y su conducción a la estación de regulación y medida.

Se compone de:

- ~ Pozos de captación.
- ~ Líneas de conducción desde los pozos de captación.

**Estación de Regulación y Medida:** instalación que permite mediante la regulación de la depresión aplicada a cada línea, obtener el biogás producido. Se compone de:

- ~ Equipos mecánicos.
- ~ Equipos de control y medida.
- ~ Equipos auxiliares.

**Central de Extracción:** se encarga de poner en depresión todos lo elementos previos antes mencionados y enviar el biogás hacia la zona de valorización. Se compone de:



### Elementos electromecánicos.

**Colector General:** es la conducción que transporta el biogás desde la central de extracción hasta los puntos de consumo. Se compone de:

“ Tubería de gas.

**Central de Control:** en ella se analizan secuencialmente las diferentes muestras a estudiar. Se compone de:

“ Armario de control y potencia

“ Central de análisis

**Antorcha:** Para la combustión del biogás excedente que no se consume en los motores.

**Sistema Motor-Generador:** es el sistema que permitirá la generación de energía eléctrica, a partir del gas, mediante su uso como combustible en motores de combustión, que a su vez accionan un generador.

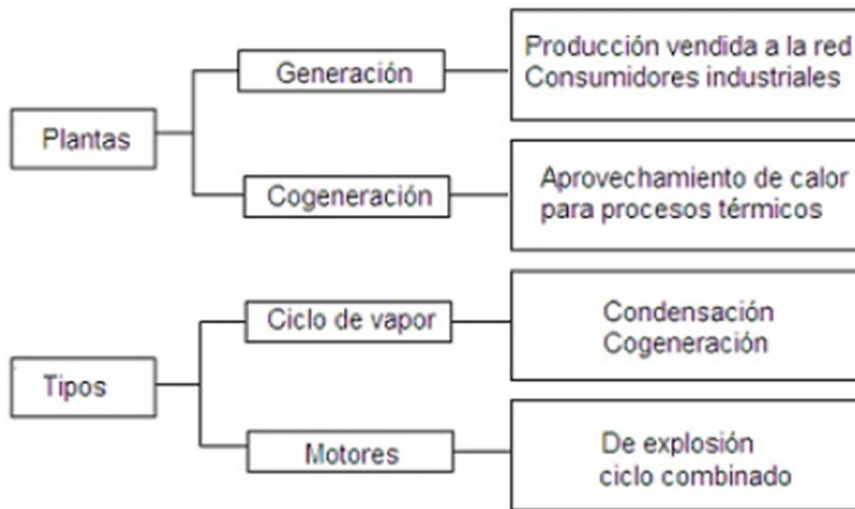
### Aspectos de la Producción de Electricidad por Biogás

Para la transformación de biomasa en electricidad existen dos posibles vías, ( Ver figura 8 ).

:

“ *Combustión de biomasa*, para producción de un fluido, vapor, en donde su contenido en energía térmica se transforma en energía mecánica por medio de una turbina.

“ *Transformación de biomasa*, mediante procesos bioquímicos, biogás, o termoquímicos (pirólisis, gasificación), la biomasa se transforma en un combustible fluido que puede ser empleado en MCI o en turbinas de gas.



**Figura 8. Generación eléctrica con biomasa**

La producción eléctrica puede realizarse en instalaciones dedicadas exclusivamente a este fin, como en centrales eléctricas, o asociarse a industrias que se dedican a actividades que puedan consumir el calor residual, como es el caso de las plantas de cogeneración.

La utilización de la cogeneración en el sector ambientalista se ha situado en los Rellenos Sanitarios y en las estaciones depuradoras de aguas residuales, basadas en los procesos de fermentación anaerobia. En el caso de la depuradora de aguas residuales el calor obtenido del motor se emplea en calentar el agua residual para mejorar la eficiencia del proceso. La energía eléctrica producida se utiliza entonces para los consumos propios de la instalación.

Un parámetro característico importante en las centrales eléctricas de cogeneración, en nuestro caso particular de biogás, es el rendimiento eléctrico, el cual será el rendimiento ( $\eta_{el}$ ) del sistema para la producción de energía eléctrica ( Ver figura 9) .

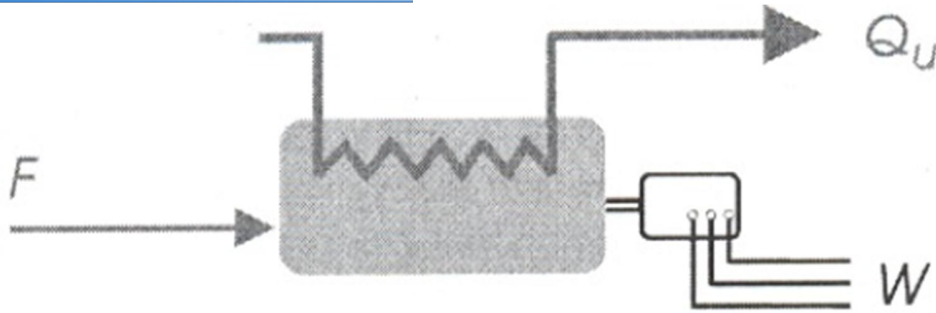


Figura 9. Esquema de energías y calor de una central de cogeneración

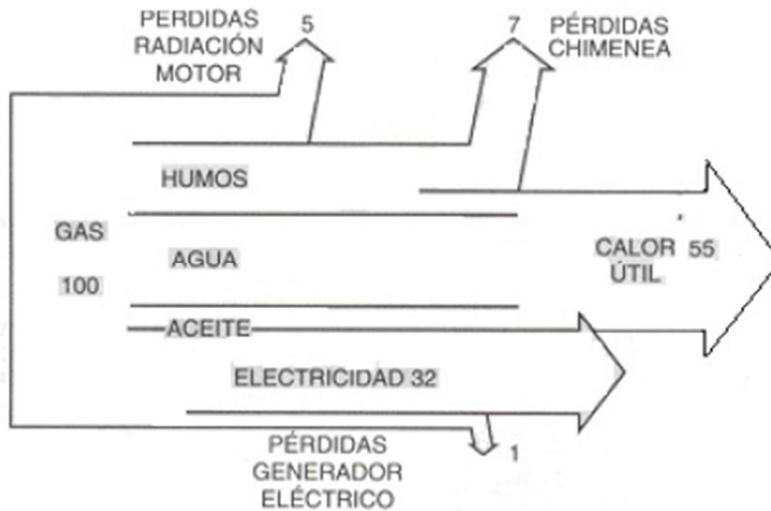
El rendimiento es una comparación entre la energía que entra al ciclo, 100%, con la que finalmente se obtiene en forma de electricidad o de calor y electricidad. Para el biogás, si se posee el valor mínimo de poder calorífico de  $4.07 \text{ kWh/m}^3$  y estimando un rendimiento del 30% se obtendría una energía del orden del 1.22 kWh, según la ecuación 3.1.

$$= W/F \quad (3.1)$$

El tipo de nomenclatura que aparece en la Figura 9. se especifica como F, la energía de combustible; W, la energía eléctrica generada;  $Q_u$ , el calor útil y P, las pérdidas.

De la energía consumida por el motor, combustible, aproximadamente el 30% se convierte en energía eléctrica, alrededor del 60% es energía térmica útil aprovechable y el resto es energía que se pierde en forma de radiación y gases de escape calientes. Esta energía térmica se puede aprovechar en forma de recuperación de calor con una consideración especial en el diseño de una planta de producción de electricidad por biogás.

Esto se muestra en la Figura 10. Con el diagrama de balance típico de un motor diesel.



**Figura 10. Balance de energía típico en un motor diesel**

El porcentaje de rendimiento eléctrico se resume en la Tabla 9, según la aplicación:

Tabla 9. Rendimientos eléctricos

Ciclo de Vapor	Rendimiento Eléctrico <sub>el</sub> (%)
Cogeneración electricidad y calor en centrales de pequeña potencia (<5MW)	18 . 22
Cogeneración electricidad y calor en centrales de media y alta potencia (>5MW)	20 . 25
Generación eléctrica en centrales trabajando a condensación	25 . 32
Otros Sistemas	Rendimiento Eléctrico <sub>el</sub> (%)
Aprovechamiento en motores de combustión interna (biogás)	30
Gasificación de biomasa y utilización en central de ciclo combinado (>5MW)	37

Los rendimientos globales de las plantas de cogeneración son mayores al añadir al rendimiento eléctrico el obtenido por la aplicación térmica  $t$ ; el cual se puede expresar de manera similar según la ecuación siguiente:

$$t = Qu/F$$

Éste será el rendimiento del sistema para producir calor útil a partir de la energía del combustible.

### **Sistema de Cogeneración por medio de Motores de Combustión Interna**

Los motores de combustión interna son el tipo de motor térmico más utilizado para la transformación de energía química de un combustible en trabajo. En sus aplicaciones convencionales, el objetivo es producir el máximo trabajo con el rendimiento más alto posible.

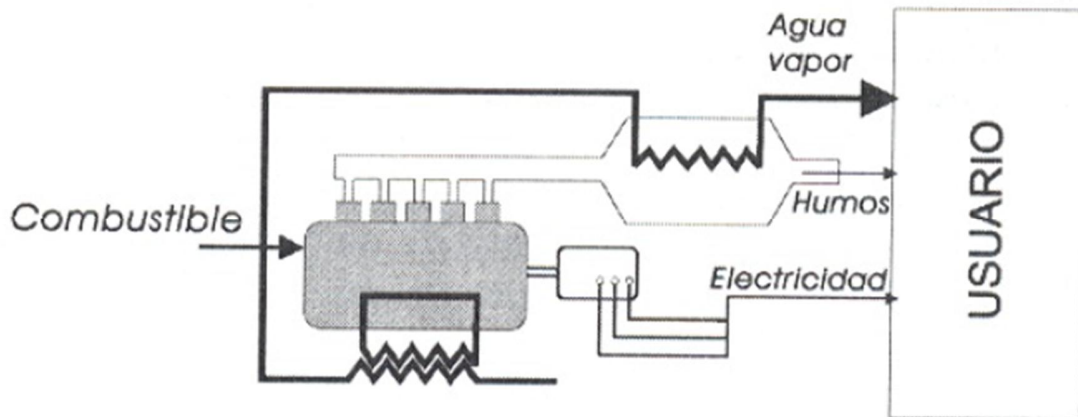
Las plantas de cogeneración que utilizan MCI pueden ser utilizadas al mezclar el biogás con el diesel o con gasolina o simplemente utilizar biogás como su combustible. A continuación se exponen algunas razones para su uso:

- ~ La disponibilidad de motores de funcionamiento seguro y eficiente en una amplia gama de tamaños.
- ~ El perfeccionamiento de los reguladores de velocidad que aseguran la generación de electricidad a la frecuencia necesaria.
- ~ La disponibilidad de combustible no convencional de buena calidad y precio atractivo, como lo es el biogás.

Existen motores alternativos que se pueden utilizar para la generación de electricidad, entre los cuales están: el de encendido provocado por chispa o gasolina, que comprende un ciclo Otto, el motor de encendido por compresión o motor Diesel, el motor Bi-fuel que opera en el ciclo Otto modificado para operar con dos combustibles (gasolina y gas), el motor a gas o biogás como combustible y el motor que consta de un ciclo dual, que requiere diesel y gas para su funcionamiento.

Además del rendimiento eléctrico y térmico, existe cierta energía que se va al sistema de refrigeración del motor y a los gases de escape, la cual se puede recuperar en forma de calor y considerarlo en la generación de electricidad.

En la Figura 11. se muestra el sistema simple de cogeneración con un motor que puede ser alimentado con biogás.



**Figura 11. Esquema de cogeneración por medio de un MCI.**

Una característica de la generación eléctrica por medio de biogás es que en estos motores el calor se puede recuperar a baja temperatura y en circuitos diferentes, por lo que parte del calor se capta del sistema de refrigeración de las camisas del motor, a 100 °C, parte del sistema de refrigeración de aceite, a 110 °C, de la refrigeración del aire de sobrealimentación del motor a 150 °C y de los gases de escape del motor, hasta unos 400°C. Por estos factores se dificulta la recuperación del calor útil del motor, por lo que en ciertos casos los gases de escape se utilizan en hornos, secaderos o produciendo vapor a baja presión o agua caliente para ser empleados en una caldera de recuperación.

En sistemas de cogeneración suelen utilizarse motores marinos de gran cilindrada sobrealimentados. Éstos se caracterizan por su alto rendimiento eléctrico, 40 - 50%, con potencias unitarias que pueden alcanzar desde los 20 MW, en motores de cuatro tiempos, hasta los 50 MW, en motores de dos tiempos. También se pueden utilizar motores de gas que son en realidad motores marinos diesel en los que se han hecho modificaciones para gasificarlos. Los rendimientos eléctricos que alcanzan son menores que los anteriores llegando hasta valores de 30 a 40%. En sistemas en donde se posee alimentación de gas natural suelen utilizarse más comúnmente, llegando a tener potencias unitarias de 3 MW.

La sobrealimentación referida anteriormente tiene como objetivo introducir en el cilindro una masa de fluido activo superior a la correspondiente a la aspiración atmosférica, para lo que éste se comprime antes de que entre en el cilindro. Con esto se consigue una mayor potencia a igualdad de cilindrada. Con este proceso el compresor comprime solamente aire, con lo que permite inyectar más combustible que el que corresponde a la cilindrada.

Una ventaja de estos motores es que pueden quemar combustible de baja calidad, líquido o gaseoso, por lo que son adecuados para su utilización en la combinación de biogás y diesel. En este caso el biogás puede remplazar hasta de un 80 a un 95% del diesel utilizado en el motor dual, esto es debido a la baja ignición del biogás lo que no permite remplazar la totalidad del diesel en este tipo de motores que carecen de bujías para la combustión. Estos motores diesel tienen un buen comportamiento y rendimiento a carga parcial, permiten un arranque fácil y no poseen limitaciones en el número de arranque.

Para los motores a biogás las medidas y dimensiones no difieren de las otras opciones de acuerdo a la potencia, su peso y construcción o requerimientos de materiales de un motor a gasolina, pero teniendo el cuidado de eliminar la reacción del  $H_2S$  con el vapor de agua. Los principales esfuerzos enfocados al desarrollo de estos motores están dirigidos hacia la optimización de las siguientes características:

- " Incrementar la relación de compresión.
- " Combustión con mezcla pobre.
- " Control de inyección de combustible y de la relación aire . combustible.
- " Ajuste del tiempo de ignición.
- " Sensores del contenido de oxígeno en el escape.

### **Combustibles Gaseosos en Motores de Combustión Interna ( MCI ) .**

Para una adecuada utilización de un combustible en un MCI debe de reunir los siguientes requisitos: mezcla y combustión rápida y no dejar residuos sólidos. Por lo que se puede reiterar lo dicho con anterioridad, que un combustible gaseoso puede ser utilizado en un MCI.

En estos MCI, se pueden utilizar los gases como el biogás o gas natural. Se trata de mezclas de gases con diferentes composiciones, de forma que en cada caso es necesario conocer su composición exacta para poder valorar su poder antidetonante. De todos los gases, el gas natural es el más utilizado por su disponibilidad y ciertas ventajas como su difusión en el aire que permite la obtención de mezclas homogéneas, pudiendo quemar mezclas más pobres.

En los motores que funcionan con gas pueden tenerse tres tipos de combustión dependiendo de las siguientes características:



## ALES Y METODOS

---

1. *MCI en los que se comprime aire y el encendido se provoca por inyección de gas a alta presión.* Son los de mayor grado de compresión y más alto rendimiento. Estos requieren compresor e inyector.
2. *MCI en los que se comprime una mezcla pobre y el encendido se realiza mediante la inyección piloto de diesel.*
3. *MCI en los que se comprime una mezcla de gas-aire, siendo el encendido provocado por bujía.* Tanto el grado de compresión como el rendimiento global es inferior que para los anteriores. El sistema de combustión requiere de carburador.

Los motores con las características del segundo tipo suelen ser duales, como se hace mención anteriormente, trabajan con diesel o con gas, con inyección piloto diesel para el encendido. Estos motores se utilizan en lugares en los que no se puede garantizar un suministro continuo de gas. En el caso de una interrupción, el motor pasa a funcionar como una unidad diesel, de forma manual o automática dependiendo de la instalación. Al interrumpirse el suministro de gas, la presión en la línea comienza a caer, y ésta depresión es la señal la que se utiliza para que el motor pase a funcionar como diesel.

El biogás en la actualidad posee tanta importancia como el gas natural en la alimentación de los MCI, sin embargo, la utilización del biogás como combustible requiere la eliminación previa del  $H_2S$ , pues es corrosivo, atacando químicamente a todas las partes metálicas del motor. El azufre se combina con el vapor de agua formando ácido sulfúrico, que atacaría a las tuberías, intercambiadores, y a todo el sistema en donde se tenga contacto. Por lo que se debe de evitar reducir la temperatura de los gases de escape por debajo del punto de rocío.

Es importante evitar el grado de humedad en el biogás y alejarlo del punto de rocío para que no se produzcan condensaciones en el contacto con las superficies más frías de las tuberías de admisión que lo conducen a los motores, por lo que se puede proceder con las siguientes etapas:

- “ Enfriamiento del gas hasta  $20^{\circ} C$ . De esta forma se produce una deshumidificación del gas hasta garantizar un contenido máximo de humedad de 20 mg/l.
- “ Separación de gotas.
- “ Calentamiento del biogás hasta  $50^{\circ}C$ . De esta manera nos alejamos de forma definitiva del punto de rocío.

## ALES Y METODOS

A continuación se presentan ciertas características de rendimiento de motores alimentados con biogás de la marca Austriaca Jenbacher Energie systeme, Tabla 10.

Modelo	Potencia Eléctrica (KW)	Potencia Térmica (KW)	Rendimiento Eléctrico %	Rendimiento Total %
JMS 312 GS-B.L	625	757	38.7	85.5
JMS 316 GS-B.L	836	1,010	38.8	85.7
JMS 320 GS-B.L	1,048	1,236	38.9	85.8

Tabla 10. Modelos de Motores de Cogeneración a Biogás

Otro ejemplo pero de un Grupo Motor . Generador alimentado a Biogás, de la casa Argentina Palmero es el especificado en la Tabla 11 y Tabla 12

Servicio / frecuencia	Prime	Standby Continua	Standby Máxima
440 V / 60 Hz	900 KVA 720 KW	900 KVA 720 KW	990 KVA 792 KW

Tabla 11. Capacidades de Generación Grupo Motor-Generador Palmero PPG-900

### Definición de Capacidades

**Potencia Prime:** Corresponde al estándar de potencia ISO 8528 para operación continua. Es aplicable para el suministro de potencia eléctrica a una carga variable por tiempo ilimitado en remplazo de energía de red comercial. Existe una sobre carga del 10% en este caso.

**Potencia Stanby Continua:** Es aplicable según ISO 8528 para el suministro de energía en la eventualidad de una falla del suministro de energía red, a una carga variable, por un número de horas ilimitado. Se dispone de un 10% de sobrecarga en este caso.

**Potencia Standby Máxima:** Corresponde a la potencia bloqueada según ISO 8528. Es aplicable como suministro de emergencia sólo en áreas con redes bien establecidas, en el evento de una falla a red. No se dispone de capacidad de sobrecarga en este caso.

## DAOS Y METODOS

<b>Datos Técnicos Motor</b>			
<b>Número de Cilindros</b>	16 en %6+	<b>Velocidad de Motor (RPM)</b>	1,200
<b>Cilindrada (l.)</b>	61,123	<b>Potencia Máxima Volante (KW)</b>	880
<b>Diámetro (mm.)</b>	160	<b>Velocidad de Pistón (m/s)</b>	9.5
<b>Carrera (mm.)</b>	190	<b>Consumo de Combustible (m<sup>3</sup> /KW<sub>e</sub> h)</b>	0.28
<b>Relación de Compresión</b>	9.5 : 1	<b>Emisión de Calor de Escape (KW)</b>	496
<b>Aspiración</b>	Turbo Sobrealimentado	<b>Emisión de Calor del Sistema de Enfriamiento (KW)</b>	715
<b>Post-enfriamiento</b>	Aire / Agua	<b>Calor Total Irrradiado (KW)</b>	80
<b>Refrigeración</b>	Agua	<b>Temperatura de Escape (°C)</b>	371
<b>Presión Mínima Gas (mbar)</b>	15 . 50	<b>Caudal de Aire de Enfriamiento (m<sup>3</sup> /min)</b>	2,654
<b>Regulador de Velocidad</b>	Electrónico	<b>Caudal de Aire de Combustión (m<sup>3</sup> /min)</b>	65.4
<b>Frecuencia (Hz)</b>	60	<b>Caudal Gases de Escape (m<sup>3</sup> /min)</b>	148.3
<b>Datos Técnicos Generador</b>			
<b>Ejecución</b>	Monocojinete	<b>Tipo de Bobinado</b>	6 Terminales
<b>Coseno Fi</b>	0.80	<b>Paso de Bobinado</b>	Acortado 2/3
<b>Tipo</b>	Brushless	<b>Distorsión de Armónicas</b>	<= 1.5%
<b>Sistema de Regulación</b>	Electrónico	<b>Intensidad a 60Hz., 440 V</b>	1.181
<b>Precisión Regulación de Tensión</b>	5%	<b>Corriente de Cortocircuito</b>	>3.5In
<b>Rendimiento 60Hz a plena Carga</b>	95.1%	<b>Reactancia transitoria, 60Hz, 440V</b>	22%
<b>Aislamiento</b>	Clase H	<b>Reactancia Subtransitoria, 60Hz, 440V</b>	16%

Tabla 12 Datos técnicos grupo Motor . Generador Palmero PPG-900



**PDF**  
Complete

*Your complimentary  
use period has ended.  
Thank you for using  
PDF Complete.*

[Click Here to upgrade to  
Unlimited Pages and Expanded Features](#)

## ALES Y METODOS

---