

#### 4.1 Relleno sanitario.

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

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

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

#### **Procesamientos aplicables a basuras.**

Podemos clasificar los procesos en:

##### ➤ **Procesamientos mecánicos.**

Trituración. Divide, mezcla y homogeniza la basura favoreciendo:

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

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

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

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

---

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

➤ **Procesamientos térmicos.**

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

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

➤ **Procesamientos biológicos.**

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

Anaeróbico. Es más lento, disipa poco calor y descompone la materia en compuestos orgánicos más simples- además de minerales- teniendo enorme importancia la producción de metano ( $\text{CH}_4$ ), gas de elevado poder energético (8,900 kcal/m<sup>3</sup>n). En la masa de basura el oxígeno se va consumiendo en las reacciones aeróbicas, transformándose en un ambiente favorable a los microorganismos anaeróbicos y facultativos, sobre todo bacterias. Determinados grupos metabolizan las proteínas, los hidratos de carbono y lípidos en un ambiente de elevado contenido de humedad, produciendo ácidos grasos, acético y otros de bajo peso molecular en la fase denominada por esta razón ácida, reconocida por el bajo pH en el ambiente y por la emanación de gases malolientes como el sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y mercaptanos<sup>9</sup>.

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

---

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

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

Los procesos biológicos generan dos productos importantes:

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

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

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

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

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

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

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

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

## A. Relleno sanitario tradicional.

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

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

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

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

## B. Relleno sanitario manual.

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

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

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

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

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

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

## Ventajas

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

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

### Limitaciones

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

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

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

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

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

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

Incluyendo:

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

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

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

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

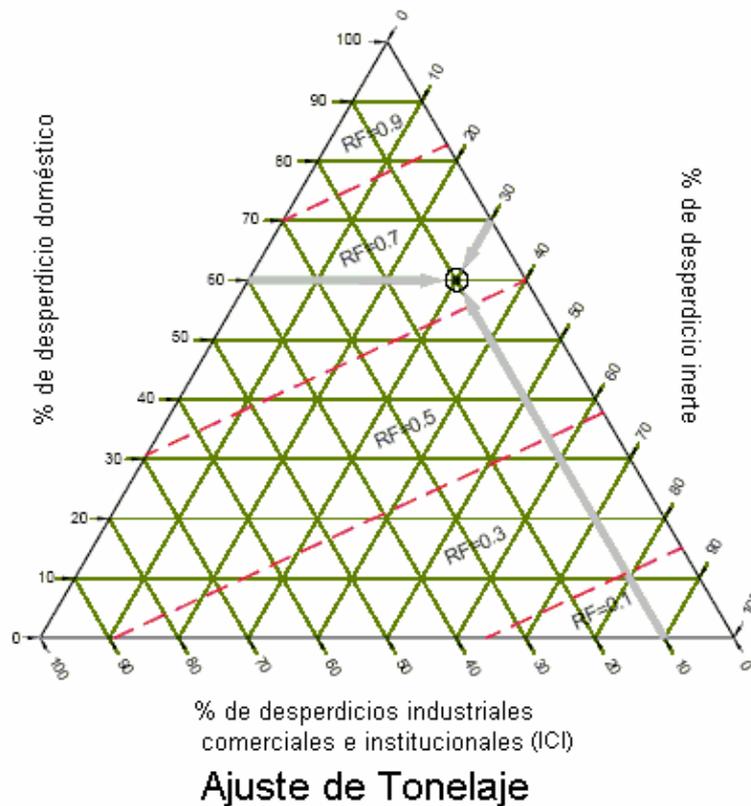
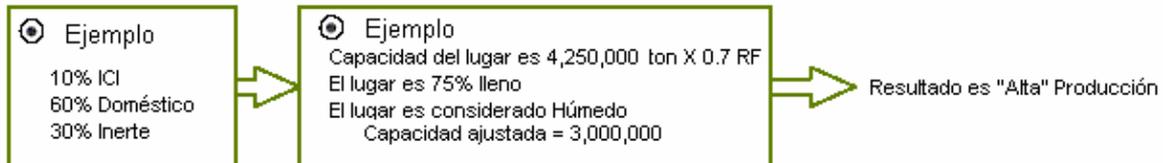
Para efectos de una caracterización inicial del sitio, la producción del GRS puede ser simplificada en función del volumen, edad y tipo de residuo, y de su contenido de humedad. El volumen de gases de efecto invernadero (GEI) es directamente proporcional al potencial de generación del GRS. Esto también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

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

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

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

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



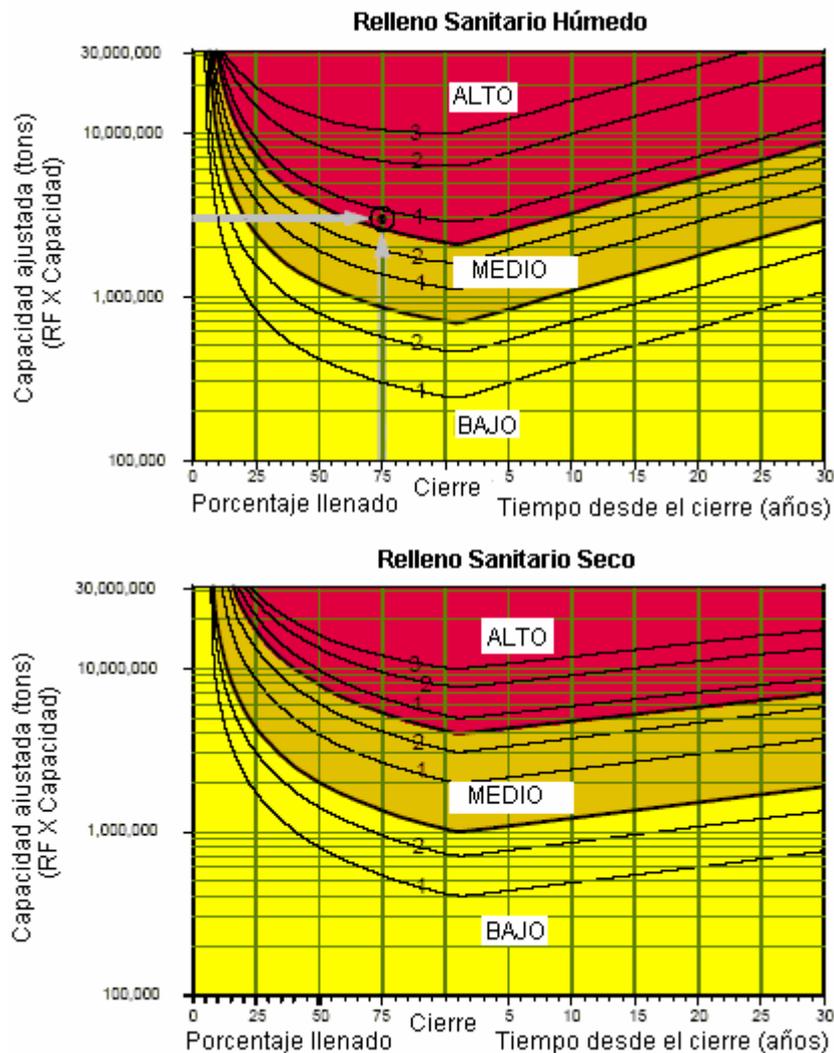
**Nota: Un relleno sanitario es considerado húmedo a menos de que sea equipado con una cubierta de permeabilidad baja o que se encuentre en un área en donde la precipitación anual sea menor que 635 mm**

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

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

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

Figura 4.2 Producción de GRS incrementa y luego disminuye.



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$Q_{CH_4i} = k * L_0 * m_i * e^{-kt} \quad \dots(1)$$

$Q_{CH_4i}$  = metano producido en el año i desde la sección i<sup>th</sup> del residuo

k = constante de generación de metano

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

$L_0$  = potencial de generación de metano

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

$t_i$  = años después del cierre

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

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

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

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

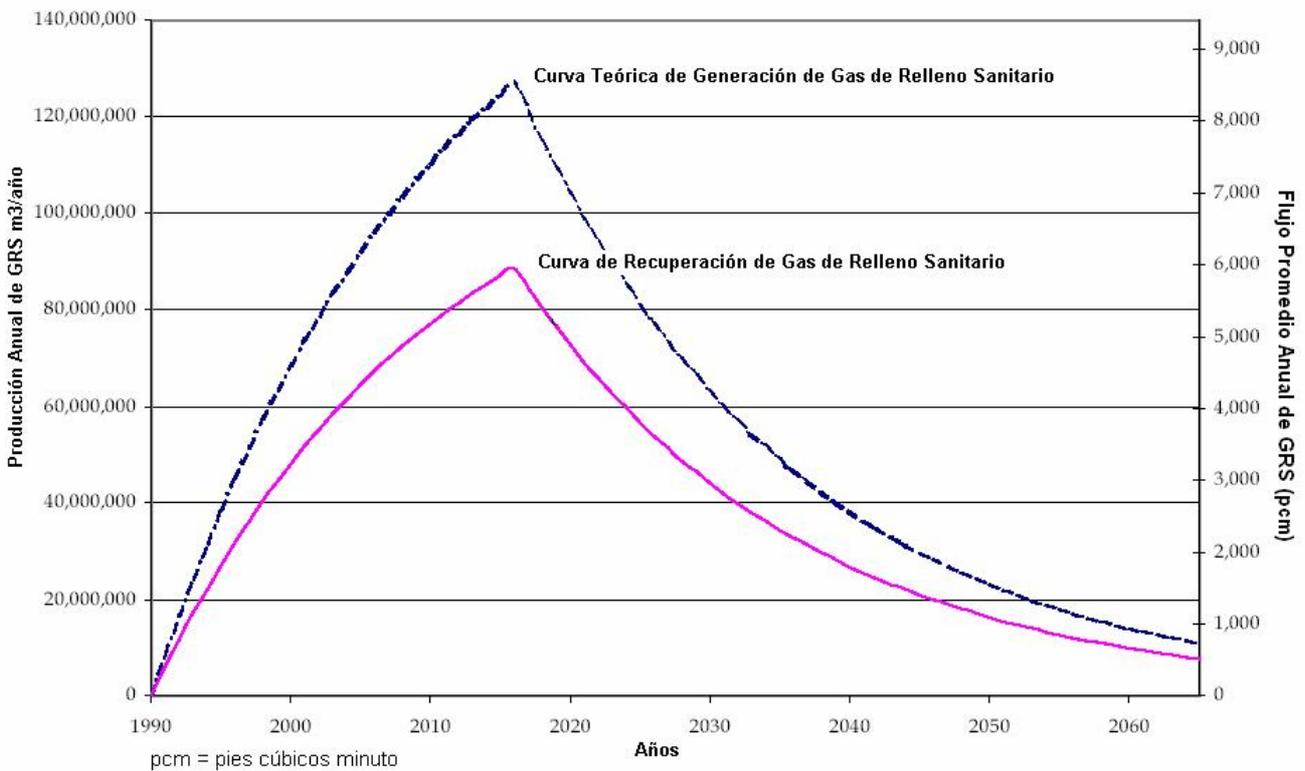
<sup>11</sup> El cual está disponible en su web site (<http://epa.gov/ttn/atw/landfill/landflpg.html>)

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

### Composición del GRS.

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

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

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

Figura 4.4 Fases que ocurren durante la generación de GRS.

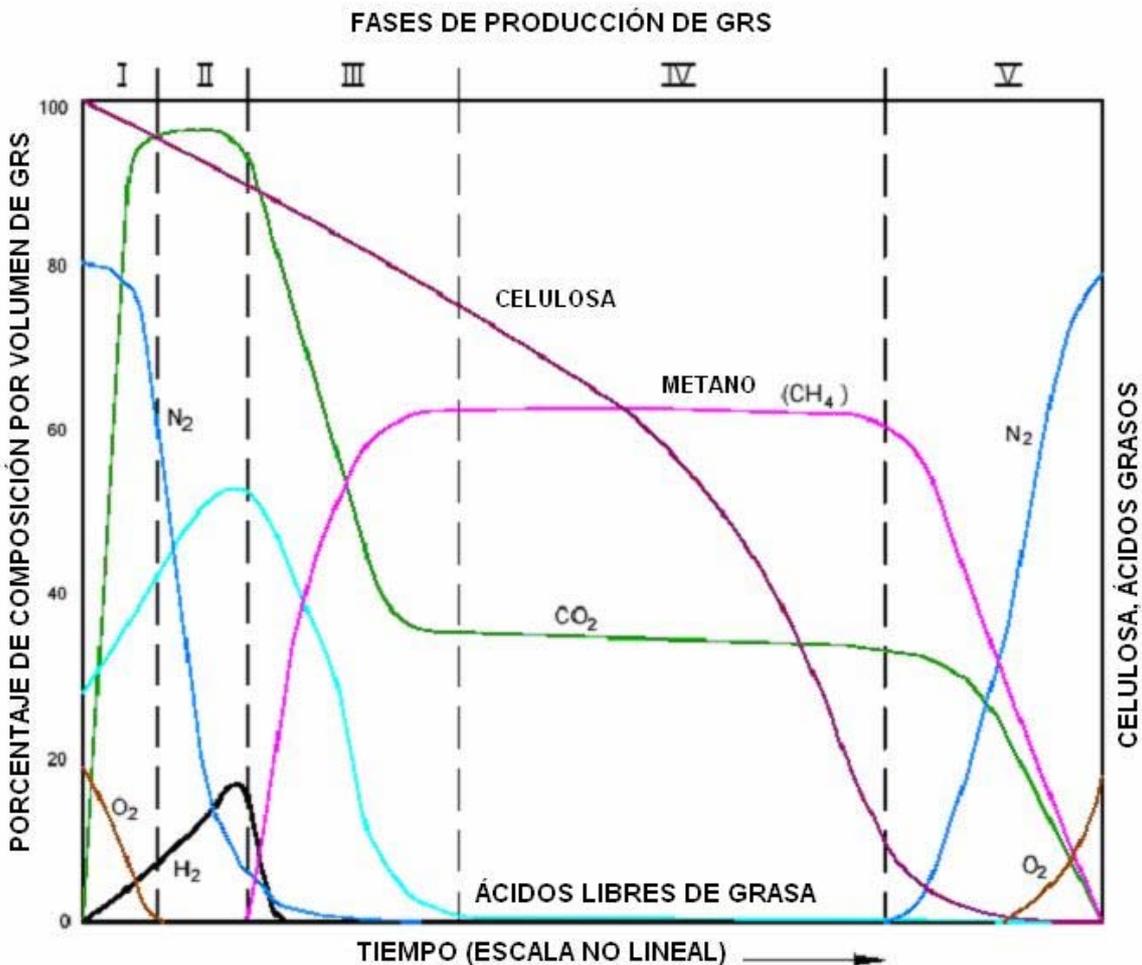


Tabla 4.3 Tiempo de descomposición de los residuos por fase.

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

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

### Impacto potencial del GRS.

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

### Beneficios potenciales de los GRS.

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

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

#### 4.2.1 Clasificación de GRS.

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

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

#### Aplicaciones del combustible de grado bajo.

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

### **Aplicaciones del combustible de grado medio.**

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

### **Aplicaciones del combustible de grado alto.**

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

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

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

## Procesamiento del GRS.

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

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

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

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

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

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

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

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

#### **Sistema de Recolección del GRS.**

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

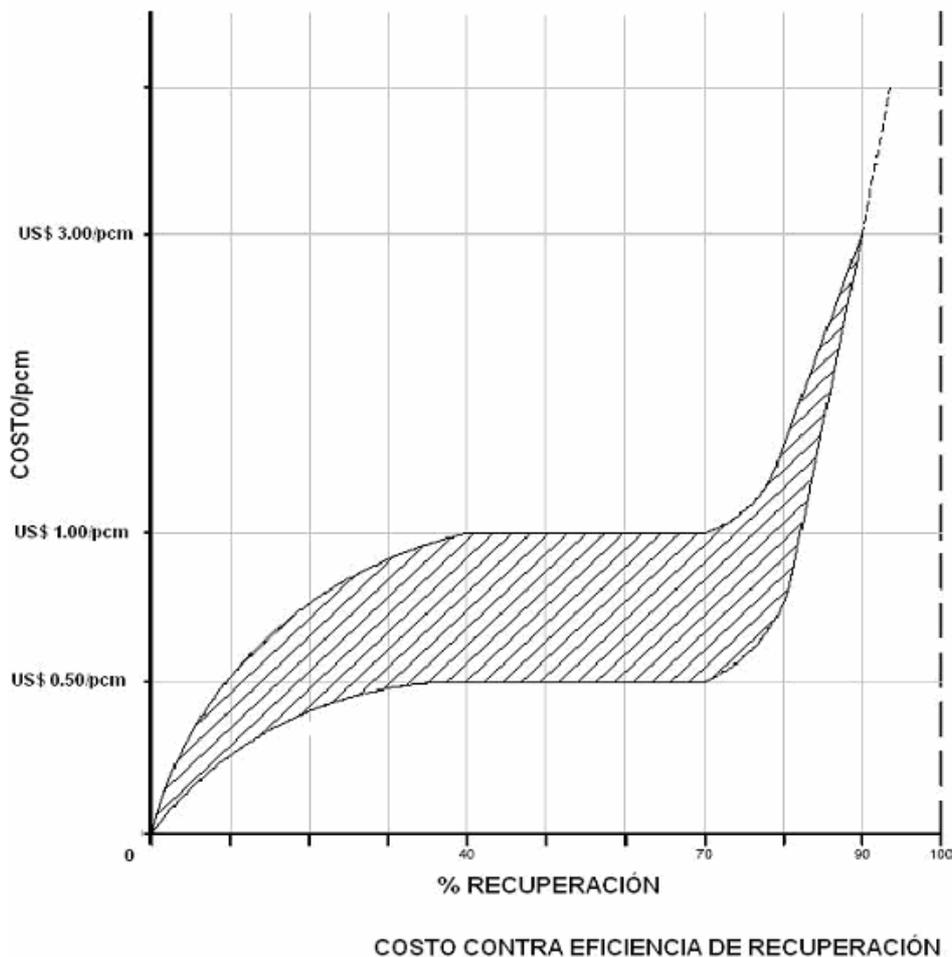
- ✓ Campo de recolección del GRS (pozos y canales);
- ✓ Tubería de recolección (laterales, secundarias, principales, etc.);
- ✓ Sistema de retiro y disposición de condensados;
- ✓ Sistema de soplado y accesorios relacionados; y
- ✓ Combustión del GRS.

### Campo de recolección de GRS.

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

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

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

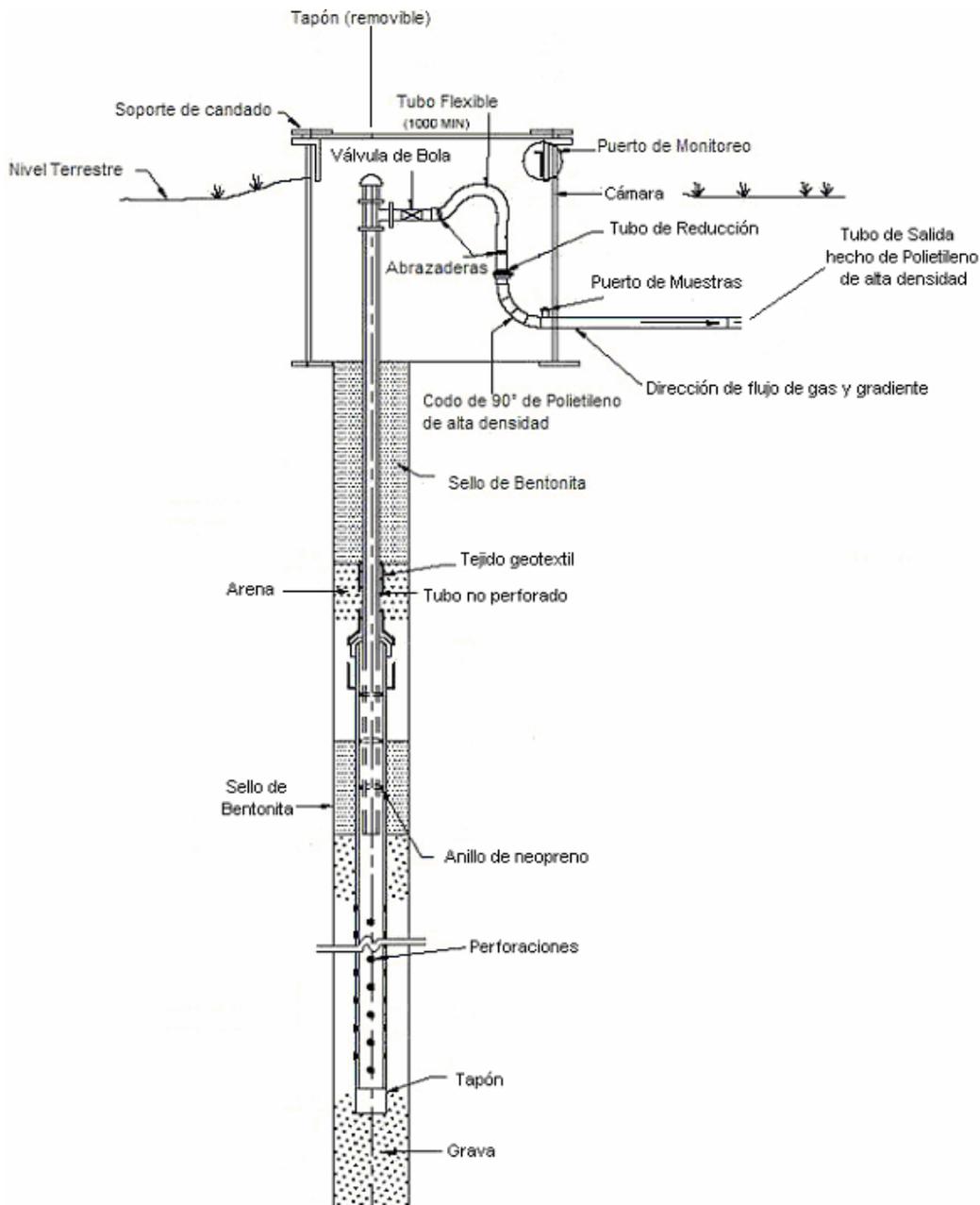


Los pozos verticales son típicamente instalados en el relleno una vez se han finalizado las operaciones. La figura 4.6 muestra el esquema típico de un pozo de extracción del GRS.

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

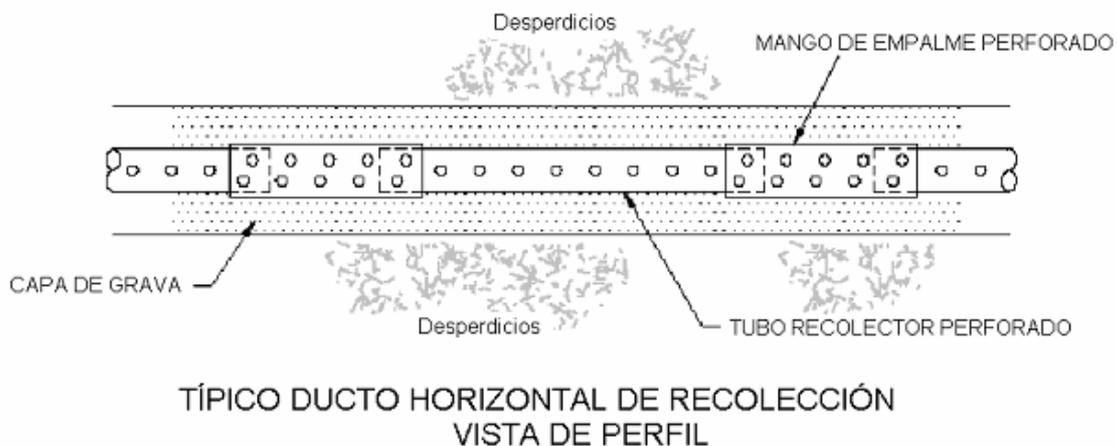
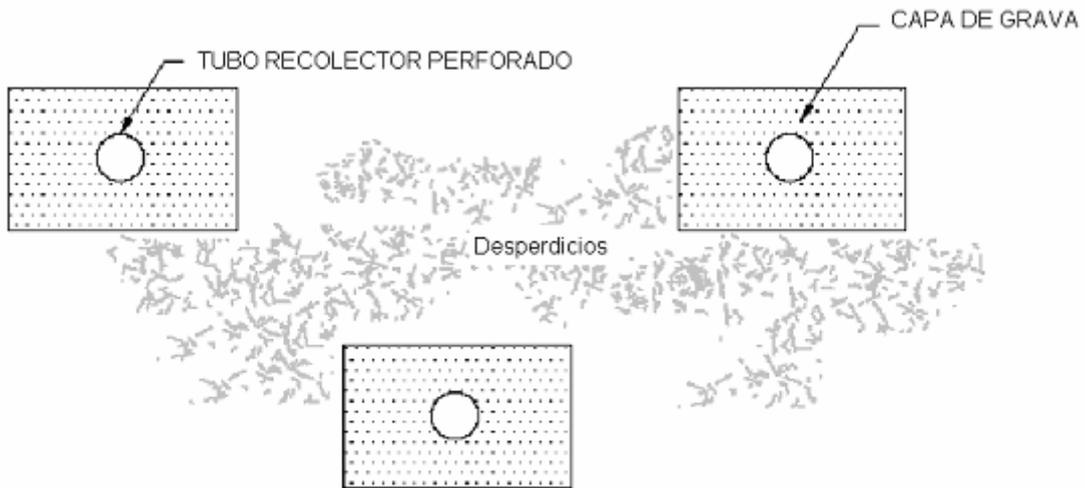
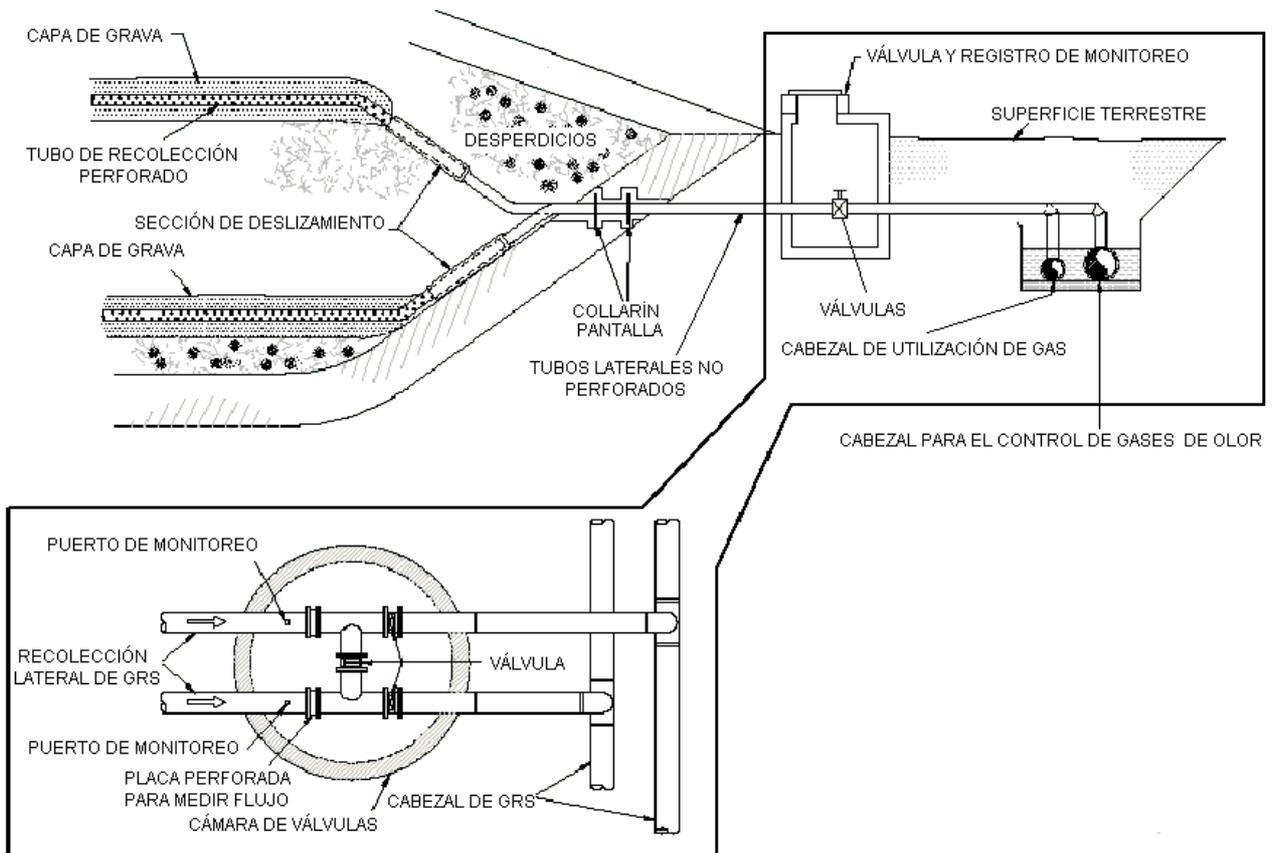


Figura 4.7 (continuación) Esquema típico de un canal o zanja horizontal de recolección del GRS.



TÍPICO DUCTO HORIZONTAL DE RECOLECCIÓN  
SECCIÓN TRANSVERSAL

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



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

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

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

*Tabla 4.4 Rangos Generales de Costos de Pozos Verticales.*

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

### **Tubería de recolección del GRS.**

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

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

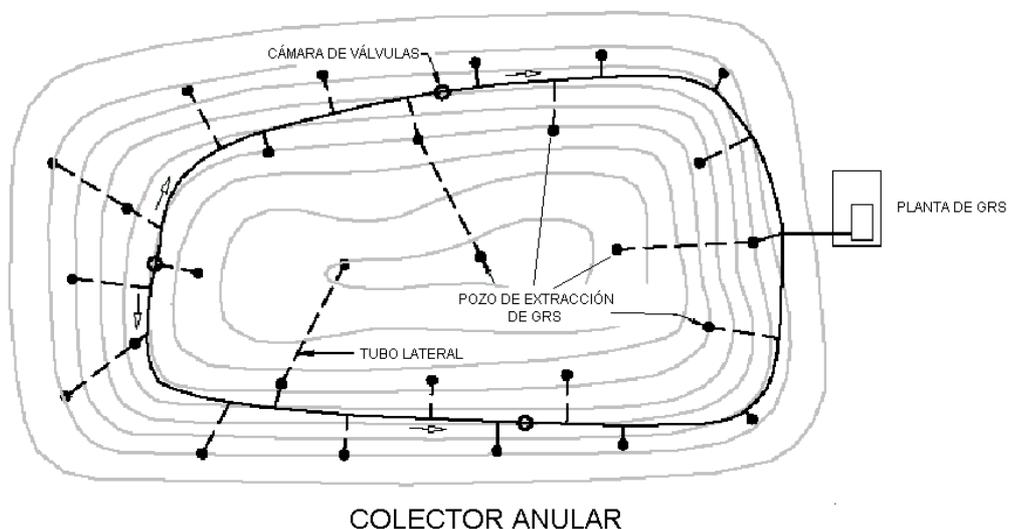
- ❖ Colectores principales que conectan los secundarios con la planta de extracción  $m^3$ .

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

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



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



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

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

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

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

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

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

Los componentes de un sistema de soplado son:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

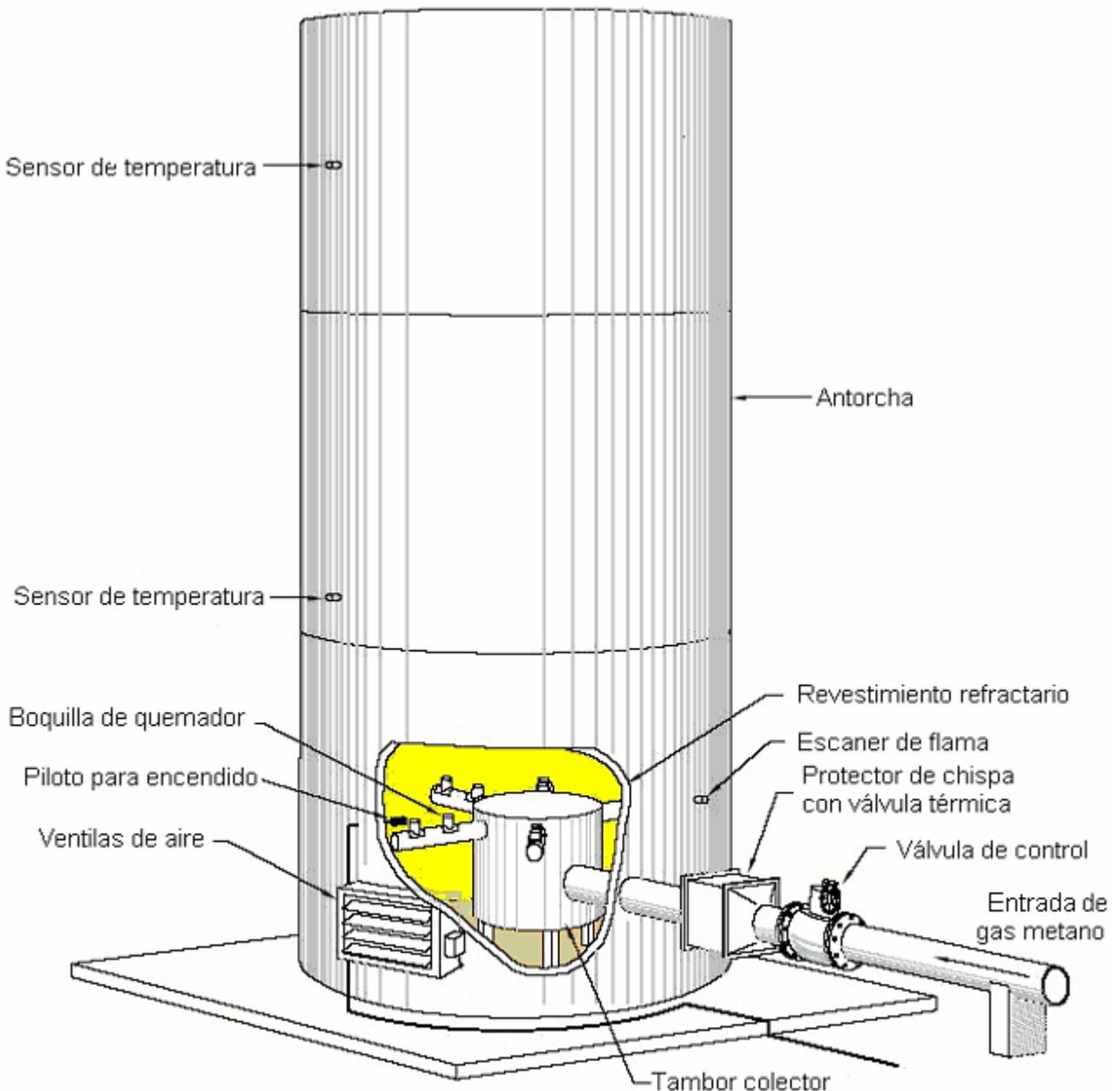
## **Combustión del GRS.**

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

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

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

Figura 4.11 Antorcha de cilindro cerrado



## Operación del sistema de recolección del GRS.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### Motores de combustión interna (Motogenerador).

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

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

*Figura 4.12 Ejemplo de motogenerador*



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

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

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

##### **Campo de recolección del GRS.**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Planta de recolección del GRS.**

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

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

**Planta de generación de energía eléctrica.**

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

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

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

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

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