

**ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA EN EXCEL QUE PERMITA EL  
CALCULO DE LA CANTIDAD DE GAS METANO Y LIXIVIADOS PRODUCIDO  
EN UN RELLENO SANITARIO, APLICADO AL MUNICIPIO DE SABANA DE  
TORRES, SANTANDER**

**JUAN CARLOS MONTEJO ALVARADO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE QUÍMICA  
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA  
2010**

**DE UNA HERRAMIENTA EN EXCEL QUE PERMITA EL CALCULO DE LA  
CANTIDAD DE GAS METANO Y LIXIVIADOS PRODUCIDO EN UN RELLENO  
SANITARIO, APLICADO AL MUNICIPIO DE SABANA DE TORRES,  
SANTANDER**

**JUAN CARLOS MONTEJO ALVARADO**

**Trabajo de grado presentado para optar al título de  
ESPECIALISTA EN QUIMICA AMBIENTAL**

**Director:  
Ing. Julio Cesar Calvo Corredor**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
ESCUELA DE QUIMICA  
ESPECIALIZACION EN QUIMICA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA  
2010**

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	11
1. MARCO TEORICO .....	13
1.1 RELLENOS SANITARIOS .....	13
1.1.1 Método de trinchera: .....	13
1.1.2 Método de área:.....	13
1.1.3 Método combinado .....	14
1.2 CELDA DIARIA .....	14
1.2.1 Cobertura de la celda.....	20
1.2.2 Frente de trabajo.....	20
1.2.3 Sistema de impermeabilización .....	21
1.2.4 Instalación de la geomembrana sobre la superficie natural .....	22
1.3 COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS .....	24
1.3.1 Composición física.....	25
1.3.2 Composición química.....	26
2. GENERACIÓN Y CONTROL DE BIOGÁS. ....	28
2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA GENERACIÓN DE GASES.....	30
2.1.1 Fase I: Ajuste inicial .....	31
2.1.2 Fase II de Transición.....	31
2.1.3 Fase III, Fase ácida. ....	31
2.1.4 FASE IV Fase de fermentación del metano .....	32
2.1.5 FASE V: Fase de maduración.....	33
2.2 DURACIÓN DE FASES. ....	33
2.3 CARACTERÍSTICA DEL BIOGÁS. ....	33
2.3.1 Volumen de Biogás .....	34
2.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE BIOGÁS.....	43
2.4.1 Drenaje de gases.....	43

3. GENERACIÓN Y CONTROL DE LIXIVIADOS .....	45
3.1 GENERACION DE LIXIVIADOS .....	47
3.1.1 Calculo de la generación de lixiviados .....	49
4. CONCLUSIONES .....	57
5. BIBLIOGRAFIA .....	59
6. ANEXOS.....	60

## TABLA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Excavación para celda de relleno sanitario .....	<b>16</b>
Figura 2. Zanja lista para instalación de geomembrana y filtros .....	<b>16</b>
Figura 3. Celda impermeabilizada.....	<b>18</b>
Figura 4. Detalle de construcción de filtros e inicio de construcción de chimenea.....	<b>18</b>
Figura 5. Celda impermeabilizada y tuberías perforadas para evacuación de gas ubicadas en el centro de cada chimenea. ....	<b>19</b>
Figura 6. Llenado de la celda.....	<b>19</b>
Figura 7. Anclaje por medio de zanjas perimetrales .....	<b>23</b>
Figura 8. Tasa de producción de biogás .....	<b>38</b>
Figura 9. tasa de producción de biogás .....	<b>40</b>
Figura 10. Canal de sección triangular.....	<b>47</b>
Figura 11. Canal de sección trapezoidal. ....	<b>47</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Propiedades típicas.....	24
Tabla 2. composición química de residuos.....	27
Tabla 3. Características generales en la composición de Biogás.....	28
Tabla 4. Características de algunos componentes en un relleno sanitario.....	29
Tabla 5. Constituyentes orgánicos rápido y lentamente biodegradables en los RSU .....	29
Tabla 6. Biodegradabilidad de los constituyentes de los RSU.....	30
Tabla 7 Constituyentes orgánicos en residuos .....	30
Tabla 8 componentes del BIOGAS.....	34
Tabla.9. Factores que intervienen en la producción de lixiviado .....	45
Tabla 10. Modelos para el cálculo de lixiviados .....	48

## RESUMEN

**ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA EN EXCEL QUE PERMITA EL CALCULO DE LA CANTIDAD DE GAS METANO Y LIXIVIADOS PRODUCIDO EN UN RELLENO SANITARIO, APLICADO AL MUNICIPIO DE SABANA DE TORRES, SANTANDER\***

**Autor: JUAN CARLOS MONTEJO ALVARADO\*\***

**Palabras claves: Residuos sólidos, Relleno sanitario, Celda diaria, biogás, lixiviado**

### DESCRIPCIÓN

Este trabajo hace énfasis en el diseño de un relleno sanitario, específicamente a los de tipo zanja o trinchera de acuerdo a la selección según la topografía y condiciones del terreno del área apta para la construcción; para ello se implemento una hoja de cálculo en Excel con el fin de simplificar o sistematizar los diferentes cálculos necesarios para el correcto diseño de los rellenos sanitarios tipo zanja o trinchera.

El enfoque del trabajo es el cálculo de la proyección de producción de biogás y lixiviado, el cálculo de la producción de biogás se realiza por estequiometria de una digestión anaerobia, dependiendo de la composición de los residuos a disponer en la celda, la distribución del biogás producido se hace siguiendo la metodología de la distribución triangular según George Tchobanoglous. El cálculo de la proyección de lixiviado generado se realiza dependiendo del balance hídrico del lugar donde se proyecte el relleno sanitario y se realiza como el balance de agua sobre una base de área de la celda diseñada.

Esta herramienta es de fácil manejo, solo se tienen que ingresar datos técnicos específicos de cada ciudad, que se encuentran por lo general en el PGIRS o en las bases de datos de las empresas prestadoras de servicios públicos y puede ser de gran utilidad puesto que permite realizar una proyección técnica y económica para solucionar un problema de tipo ambiental y social.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ciencias. Especialización en Química Ambiental. Director: Ing. Julio Cesar Calvo Corredor

## ABSTRACT

**ELABORATION OF AN EXCEL TOOL THAT ALLOWS THE CALCULATION OF THE AMOUNT OF METHANE GAS AND LEACHATE PRODUCED IN LANDFILLS, APPLIED TO THE MUNICIPALITY OF SABANA DE TORRES, SANTANDER\***

**Author: JUAN CARLOS MONTEJO ALVARADO\*\***

**Key words: solid waste, landfill, daily cell, biogas, leachate**

This paper emphasizes the design of a landfill, specifically the type trenching according to the selection according to topography and soil conditions of the area suitable for construction, for it was implemented in an Excel spreadsheet with In order to simplify and systematize the various calculations required for the proper design of landfills type trenching

The focus of the study is to calculate the projected production of biogas and leachate, the calculation of biogas production is performed by anaerobic digestion stoichiometry, depending on the composition of waste to dispose in the cell, the distribution of biogas is produced using the method of the triangular distribution as George Tchobanoglous. The calculation of the projection of leachate generated is carried out on the water balance of where the landfill is planned and is done as the water balance on an area of the cell designed.

Additionally we present the calculations of the costs of operation of the landfill, estimates of the value of the Final Disposal fee as established in Resolution CRA 351 of 2007 and calculations for sizing the perimeter channels for water management runoff at the landfill

This tool is easy to use, only have to enter technical data specific to each city, who are usually in the PGIRS or databases of the companies providing public services and can be very useful since it allows perform a technical and economic projections for solving a problem of environmental and social

---

\* Work Degree

\*\* Faculty of Sciences. Specialization in Enviromental Chemistry. Directress: Ing. Julio Calvo

## INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas de las actividades humanas tanto productivas como cotidianas es la generación de residuos sólidos y su respectiva disposición final, la cual anteriormente se realizaba sin ningún tipo de técnica, ni control, en la actualidad la tecnología más aceptada para realizar la disposición final de los residuos sólidos generados por las actividades antrópicas es la del relleno sanitario.

La definición dada a relleno sanitario según el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico, RAS 2000 es: el lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo a la salud pública, minimizando y controlando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería, para la confinación y aislamiento de los residuos sólidos en un área mínima, con compactación de residuos, cobertura diaria de los mismos, control de gases y lixiviados, y cobertura final.

El método del relleno sanitario para la disposición de residuos sólidos, es en la actualidad el de mayor uso a nivel mundial, ya que por un lado minimiza riesgos de contaminación, cumpliendo con normas ambientales en su diseño, Construcción, operación y control, así como, por su bajo costo económico, comparado con otros sistemas de disposición.

El método del relleno sanitario tiene otras ventajas adicionales, como por ejemplo; el equipamiento y los materiales utilizados se localizan localmente o regionalmente, el personal utilizado, no requiere de una especialización y capacitación compleja, y por último la rapidez para desarrollar su construcción y operación.

La disposición controlada de los residuos dentro de una celda que cumpla con las normas técnicas exigidas por la legislación no es el único punto a tener en cuenta dentro del diseño y operación de un relleno sanitario, otro punto muy importante es la generación de biogás que es causada por la degradación anaerobia de la materia orgánica presente en los residuos y también la generación de lixiviados, que los cuales son definidos en el Ras 2000 como el líquido residual generado por la descomposición biológica de la parte orgánica o biodegradable de la basura

Bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas o como resultado de la percolación de agua a través de los residuos en proceso de degradación.

La determinación de las cantidades de gas y lixiviado que se generan año a año

en un relleno sanitario son fundamentales para establecer los métodos de tratamiento de estos, permitiendo la adecuada planificación de las medidas correctivas o mitigadoras del impacto que el biogás y el lixiviado puedan generar al ambiente, así como también permiten planificar alternativas de aprovechamiento del biogás.

Es así como se plantea en este documento presentar una recopilación de las bases teóricas para la determinación de la cantidad de biogás y lixiviado que se pueda generar en un relleno sanitario, utilizando para este fin, una aplicación en una hoja de cálculo en Excel, de igual manera se presentan los cálculos básicos para el diseño completo de un relleno sanitario tipo zanja o trinchera.

Rellenos sanitarios tipo zanja o trinchera.

El foco del trabajo es el cálculo de la proyección de producción de biogás y lixiviado, el cálculo de la producción de biogás se realiza por estequiometría, dependiendo de la composición de los residuos a disponer en la celda, la distribución del biogás producido se hace siguiendo la metodología de la distribución triangular. El cálculo de la proyección de lixiviado generado se realiza dependiendo del balance hídrico del lugar donde se proyecte el relleno sanitario y se realiza como el balance de agua sobre una base de área de la celda diseñada.

Adicionalmente se presentan los cálculos de los costos de operación del relleno sanitario, los cálculos del valor de la tarifa de Disposición Final de acuerdo a lo establecido en la Resolución CRA 351 de 2007 y los cálculos para dimensionar los canales perimetrales para el manejo de aguas de escorrentía en el relleno sanitario.

## **1. MARCO TEORICO**

### **1.1 RELLENOS SANITARIOS**

La definición dada a relleno sanitario según el RAS 2000 ya fue presentada, para complementar se presenta la definición de relleno sanitario que da la Sociedad Norteamericana de Ingenieros Civiles, ASCE, la cual define: "Relleno sanitario es una técnica para la disposición de residuos sólidos en el suelo sin causar perjuicios al medio ambiente y sin causar molestias o peligro para la salud y seguridad pública; este método utiliza principios de ingeniería para confinar la residuos sólidos en la menor área posible, reduciendo su volumen al mínimo practicable y cubriendo los residuos depositados con una capa de tierra con la frecuencia necesaria o por lo menos al fin de cada jornada". Existen tres métodos esenciales para operar un relleno sanitario, con la finalidad de colocar las capas de residuos sólidos y cubierta final en forma adecuada. Estos métodos de operación del relleno sanitario son los siguientes:

#### **1.1.1 Método de trinchera:**

Consiste en depositar los residuos sólidos sobre el talud inclinado en la trinchera (talud 1:3), donde son esparcidos y compactados con el equipo adecuado en capas, hasta formar una celda que después será cubierta con el material excavado de la trinchera, con una frecuencia mínima de una vez al día, esparciéndolo y compactándolo sobre el residuo. Este método es usado normalmente donde el nivel de aguas freáticas es profundo, las pendientes del terreno son suaves y las trincheras pueden ser excavadas utilizando equipos normales para movimientos de tierra.

#### **1.1.2 Método de área:**

El método es similar al de trinchera y consiste en depositar los residuos sobre el talud inclinado, se compactan en capas inclinadas no mayores de 60 cm hasta formar la celda que después se cubre con tierra. Las celdas se construyen inicialmente en un extremo del área a rellenar y se avanza hasta terminar en el otro extremo.

Este método se puede usar en cualquier terreno disponible como canteras abandonadas, inicio de cañadas, terrenos planos, depresiones y ciénagas contaminadas; un punto importante en este método, para que el relleno sea económico. Es que el material de cubierta debe transportarse de lugares cercanos a éste.

### **1.1.3 Método combinado**

En algunos casos, cuando las condiciones geohidrológicas, topográficas y fisiográficas del sitio elegido para llevar a cabo el relleno sanitario son apropiadas, se pueden combinar los dos métodos anteriores; por ejemplo, se inicia con el método de trinchera y posteriormente se continúa con el método de área en la parte superior. Otra variación del método combinado consiste en iniciar con un método de área, se excava el material de cubierta de la base de la rampa, formándose una trinchera, la cual servirá también para ser rellenada. El método combinado es considerado el más eficiente, ya que permite ahorrar el transporte del material de cubierta (siempre y cuando exista en el sitio en cantidad y calidad suficientes) y aumenta la vida útil del sitio. De acuerdo a las condiciones topográficas del área el método más eficiente a utilizar sería el tipo trinchera así mismo la ubicación cerca de la planta de reciclaje hace una operación muy económica puesto que los materiales que se puedan reincorporar a un nuevo ciclo de vida útil podrán ser extraídos en la planta mientras que los otros terminarían en el relleno sanitario.

## **1.2 CELDA DIARIA**

Para cualquiera de los tres métodos de operación del relleno sanitario la unidad fundamental de operación es la celda.

Se llama celda a la conformación geométrica que se le da a los residuos sólidos y al material de cubierta (tierra), debidamente compactada mediante equipo mecánico. Los elementos de una celda son: altura, largo, ancho del frente de trabajo, pendiente de los taludes laterales y espesores del material de cubierta diario y del último nivel de celdas. La altura de la celda depende de la cantidad de los residuos que se depositen, del espesor del material de cubierta, de la estabilidad de los taludes y la compactación. Mientras más altas sean las celdas, menor será la cantidad de tierra necesaria para cubrir los residuos.

El ancho mínimo de las celdas o mínimo frente de trabajo, dependerá de la longitud de la cuchilla y del equipo que se emplee en la construcción de las celdas. Se recomienda que el ancho mínimo sea de 2 a 2.5 veces el largo de la cuchilla de la maquinaria, otra práctica muy común es tomar como frente de trabajo o celda diaria una longitud equivalente al doble del radio del vehículo más largo que deposite residuos en el lugar de disposición final. Con el propósito de facilitar la operación de un relleno sanitario, con base en el volumen de residuos sólidos urbanos que llegan al sitio, debe diseñarse la forma de confinamiento geométrico más adecuada tanto a las características del sitio como a la maquinaria empleada. Dicha conformación geométrica de residuos junto con el material de cubierta (tierra), recibe el nombre de celda.

Aunque el tamaño de las celdas cambia según la cantidad de residuos sólidos que llegue al relleno sanitario, todas las celdas deben tener las mismas características constructivas. Una de las principales características es que la celda debe albergar todos los residuos municipales que el relleno sanitario reciba en el transcurso de una jornada.

En el relleno sanitario cada celda de residuos sólidos debe ser, en esencia, un bloque debidamente compactado y totalmente cubierto, el cual contenga los residuos urbanos generados en un día.

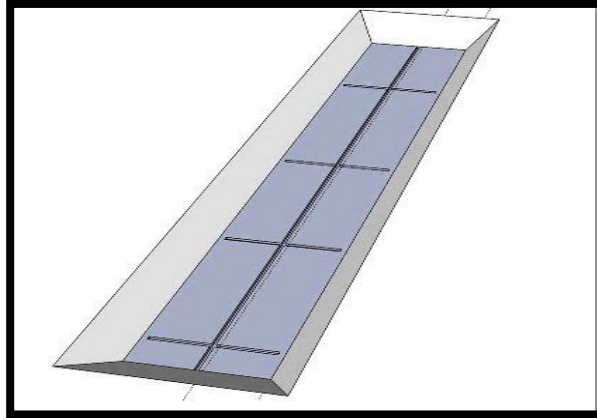
Las dimensiones y volumen de la celda varían de acuerdo con la cantidad de residuos sólidos que recibe el relleno, el método de operación empleado, la superficie del terreno disponible, la maquinaria utilizada y el material de cubierta disponible en el sitio o el que se suministre de un banco cercano. Sin embargo, las dimensiones de una celda de residuos sólidos deben regirse por las siguientes especificaciones:

- ❖ **Altura:** Puede variar desde 1 a 5 m, incluyendo el espesor de la cubierta, con un talud cuya relación entre la altura y avance sea 1:2.5 hasta 1:3. El talud más utilizado por razones de estabilidad es el talud 1:3 (V:H), el RAS 2000 establece este tipo de características constructivas del relleno sanitario.
- ❖ **Largo de la celda:** Este parámetro depende de las necesidades del proyecto, de la operación de cada sitio y de la superficie de terreno disponible. También está determinada por el volumen diario de residuos a disponer. Generalmente se realiza una excavación de ciertas dimensiones para albergar los residuos de un determinado periodo de tiempo.
- ❖ **Ancho de la celda:** Esta dimensión está condicionada por el frente de trabajo necesario para que la maquinaria funcione y maniobre adecuadamente, para realizar el acomodo y la compactación de los residuos sólidos. La celda debe tener el ancho suficiente para permitir la descarga de los equipos de recolección de residuos sólidos. Así pues, el ancho de la celda depende de la cantidad de residuos, del tamaño de la maquinaria y de las necesidades mínimas de operación de los vehículos y las máquinas.

En el caso de los rellenos sanitarios tipo zanja o trinchera, que son el énfasis de esta monografía, se procede a realizar la marcación de la excavación, la cual se proyecta para que tenga una vida útil o periodo de operación no menor a 90 días.

Una vez esté marcada la celda, se procede a realizar la excavación, dependiendo de la geometría de esta se realiza también el trazado y excavación de las zanjas para la instalación de filtros y construcción de chimeneas, el siguiente grafico representa una excavación para una celda de un relleno sanitario terminada.

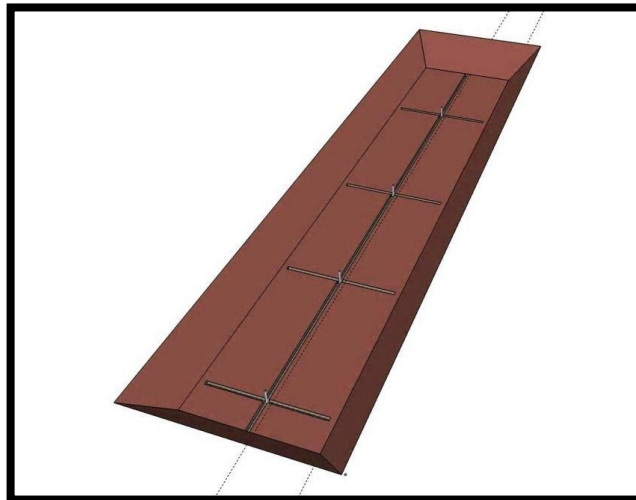
Figura No. 1. Excavación para celda de relleno sanitario



Terminada la excavación se realiza la limpieza de taludes y fondo de la celda para preparar el terreno para la instalación de la geomembrana, en algunos casos se instala primero una capa de arcilla de un espesor no menor a 0.3 metros, de esta manera se protege la geomembrana de piedras o guijarros que puedan romperla durante la instalación y operación y además mejora la impermeabilización del suelo. En algunos lugares el suelo donde se construye el relleno sanitario es bastante arcilloso y no requiere de la instalación de geomembrana, este tipo de situaciones deben ser muy bien justificadas técnicamente ante la autoridad ambiental, quien aprueba la impermeabilización solamente con arcilla.

Concluida la adecuación de la celda se procede a realizar la instalación de la geomembrana, la impermeabilización incluye las zanjas para la instalación de filtros.

Figuran No. 2. Zanja lista para instalación de geomembrana y filtros



Las zanjas para la instalación de filtros deben ser cubiertas en el fondo con una capa de piedra para soportar los tubos perforados que conforman los filtros, las perforaciones deben estar direccionadas hacia la superficie de la celda, es decir para arriba, después de colocar los tubos los cuales deben tener un diámetro mínimo de 6" y las perforaciones deben tener un diámetro mínimo de 3/8" (en algunos casos los tubos son recubiertos con geotextil para minimizar la posibilidad de taponamiento de los orificios de los tubos) se rellenas las zanjas con piedra, los filtros son contruidos formando un enrejado o malla que tenga influencia para el drenaje de todo el lixiviado generado en la celda, las chimeneas se ubican a una distancia máxima de 50 metros entre una y otra de manera que se tenga un radio de influencia de 25 metros por cada chimenea, y se ubican sobre las uniones de la línea principal de lixivios con las líneas laterales o secundaria de recolección del lixiviado generado en la celda, la pendiente mínima de las zanjas para construcción de filtros debe ser del 5%. Las chimeneas pueden ser conformadas en malla para gavión, en el centro de ellas debe ir una tubería perforada de un diámetro de 4" para permitir la evacuación del gas, la tubería está rodeada de piedra para evitar el taponamiento de los orificios y así asegurar la evacuación del biogás generado por la biodegradación de los residuos, la tubería central debe terminar de tal manera que se pueda instalar un quemador que permita hacer la combustión del biogás en el caso de rellenos sanitarios en los cuales no se realiza un aprovechamiento del biogás.

Las chimeneas se construyen en la medida que la altura de los residuos en la celda va aumentando, no se conforman con toda su altura desde el inicio de operación de la celda para evitar que la chimenea se derrumbe o se dañe, se construye con el avance de los residuos de manera que estos ayuden a soportar el peso de las piedras que conforman la chimenea y que protegen a la tubería perforada de posibles taponamientos. Las chimeneas deben sobresalir por lo menos un metro por encima del nivel final de llenado de la celda, incluyendo material de cobertura y las perforaciones de la tubería central de la chimenea no se perforan hasta la parte más alta de la chimenea, se perforan hasta la altura máxima que alcancen los residuos en la celda. El siguiente gráfico muestra la celda impermeabilizada y el detalle de construcción de filtros y chimeneas.

Figura No. 3 Celda impermeabilizada

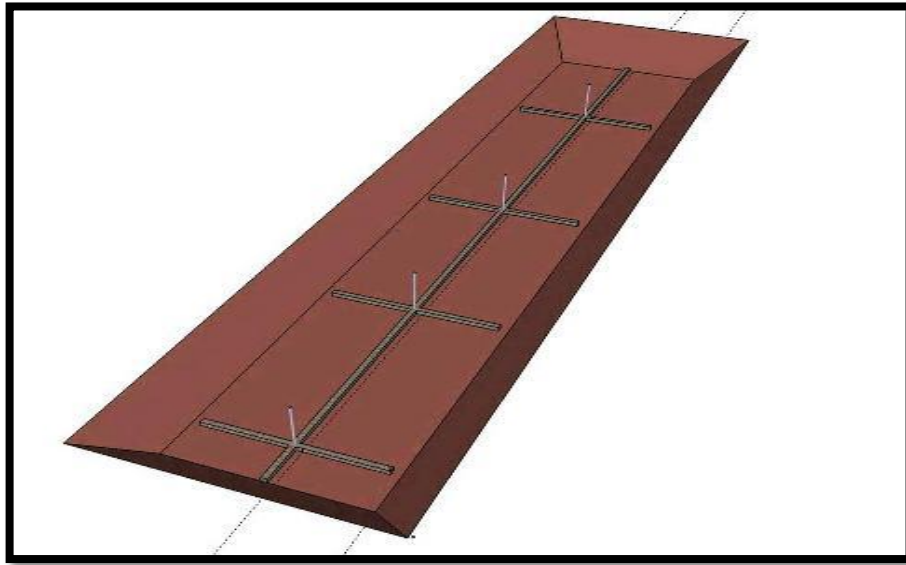


Figura No. 4. Detalle de construcción de filtros e inicio de construcción de chimenea

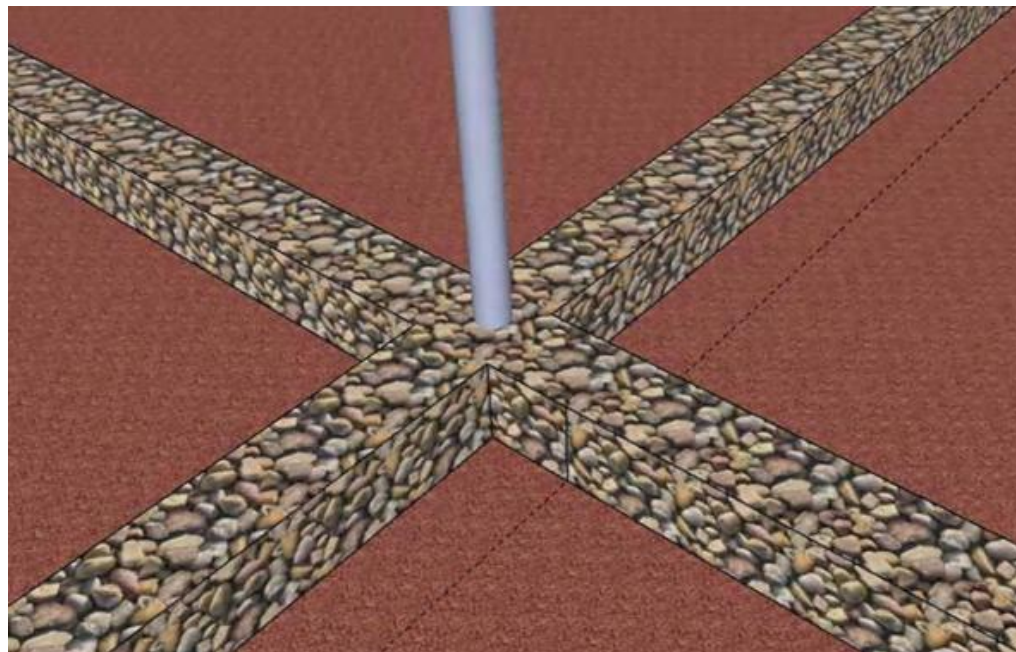
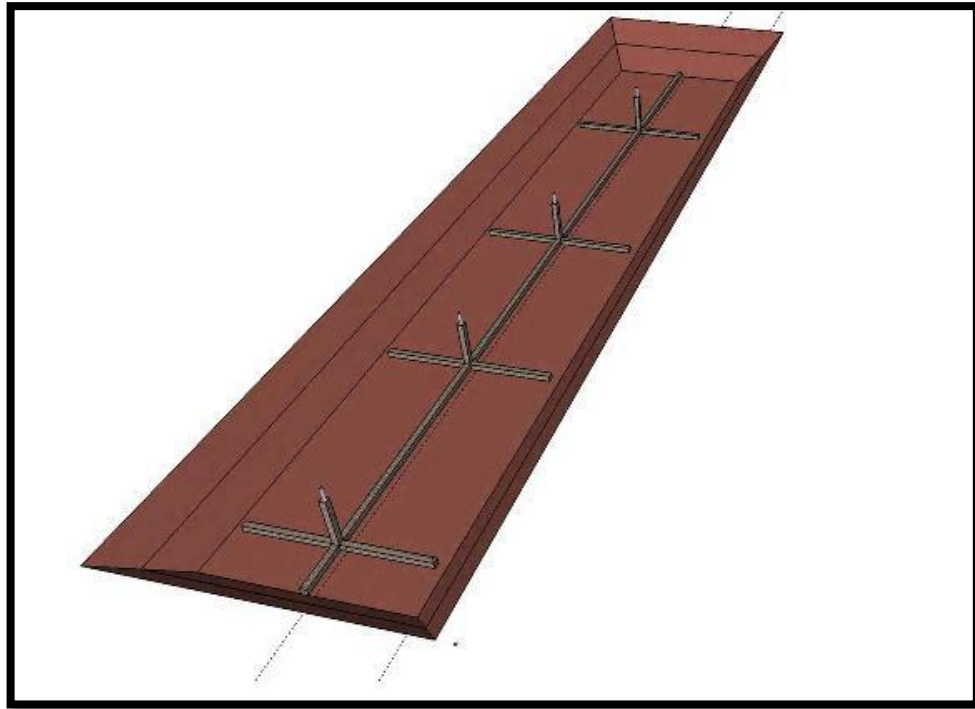
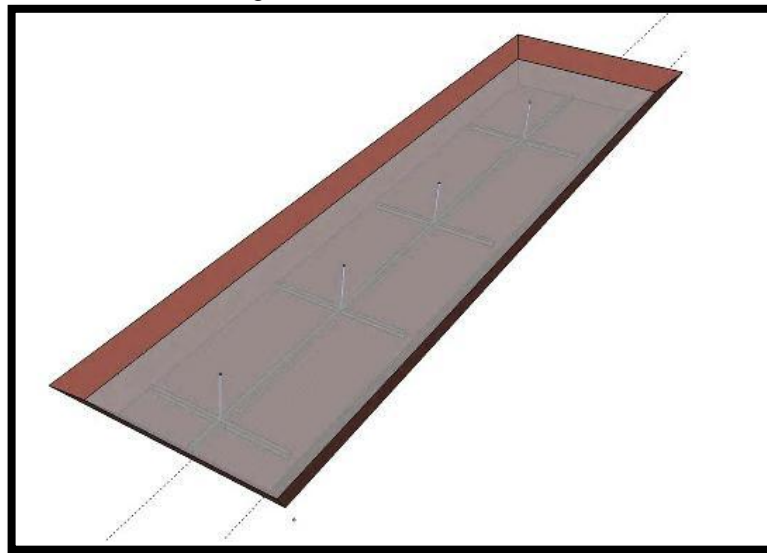


Figura No. 5. Celda impermeabilizada y tuberías perforadas para evacuación de gas ubicadas en el centro de cada chimenea.



La grafica que aparece a continuación muestra el avance del llenado de la celda una vez han sido concluidas todas las adecuaciones.

Figura 6. Llenado de la celda



### **1.2.1 Cobertura de la celda**

El material de cubierta tiene las siguientes funciones: impedir la entrada y salida de fauna nociva, reducir la emisión de biogás, los malos olores y evitar incendios así como también disminuir la entrada de agua. Las pruebas experimentales realizadas en diversos rellenos sanitarios de los E.U.A. han demostrado que una capa de 15 cm de material arenoso compactado al 95% proctor cumple con estos requisitos. La aplicación diaria de la cubierta reduce la atracción de los residuos sobre las aves y los roedores en busca de alimento y es esencial para mantener una buena apariencia del relleno sanitario.

Muchos tipos de suelos cuando están debidamente compactados muestran baja permeabilidad, no se contraen y pueden ser usados para controlar el agua que pudiera entrar al relleno e incrementar el volumen de lixiviado. El control de la emanación de gases es también una función esencial de material de cubierta. Dependiendo de la profundidad planeada para el término recuperado por el relleno, los gases pueden ser bloqueados o ventilados a través del material de cubierta. Un suelo permeable que no retenga mucha agua puede servir como un buen material para ventilar los gases. Arena limpia, grava pequeña o roca quebrada son excelentes cuando se mantienen secas. El cubrir los residuos también protege contra el fuego. Casi todos los suelos son incombustibles por lo que la cubierta y los taludes de cada una de las celdas del relleno ayudan a confinar el fuego, dentro de ésta. La celda diaria de residuos sólidos deberá cubrirse con tierra compactada, tanto en la superficie como en los taludes, de tal manera que al final del día no queden residuos sólidos sin cubrir.

### **1.2.2 Frente de trabajo**

La longitud del frente de trabajo corresponderá al ancho de la celda a construirse, por lo tanto, al diseñarse ésta se tendrán en cuenta las exigencias requeridas para un frente de trabajo. Se denomina frente de trabajo a la dimensión mínima necesaria para que la maquinaria funcione y maniobre adecuadamente para realizar el acomodo y compactación de los residuos sólidos, tomando también en cuenta el número de unidades recolectoras que llegan al relleno sanitario en horas pico.

En este punto se determinarán las dimensiones mínimas de las áreas de trabajo diario dentro del relleno sanitario, buscando optimizar los rendimientos de maquinaria para la compactación de los residuos confinados y el material de cobertura diaria, además de agilizar las maniobras de los vehículos que descargan los residuos en el frente operativo.

Para lograr establecer las dimensiones del frente se consideraron dos tipos de usuarios de vehículos; los de carga lenta y los de carga rápida, la diferencia entre

ambos es que los primeros no poseen mecanismos de descarga, esto se realiza manualmente, y los segundos si cuentan con mecanismo de descarga, mecánico y/o hidráulico.

### **1.2.3 Sistema de impermeabilización**

El agua subterránea es la fuente futura de abastecimiento más valiosa con que se cuenta para el desarrollo de las próximas generaciones, por lo que es imprescindible evitar su contaminación.

Debido a lo anterior es necesario proteger los acuíferos. Su protección se puede efectuar de dos maneras: natural o artificial. El método de impermeabilización natural consiste en aprovechar las propiedades fisicoquímicas del suelo y las características del material del subsuelo, para evitar la contaminación de las aguas subterráneas por la acción de los lixiviados.

De acuerdo con recomendaciones los sitios con alto contenido de arcillas (entre 0.30 y 1.00 m de espesor) y/o con capas impermeables a poca profundidad son los mejores. El método de impermeabilización artificial, consiste en colocar materiales naturales con artificiales con el fin de evitar que los lixiviados penetren al acuífero. Los materiales generalmente empleados son:

#### **Naturales y/o Artificiales.**

Entre los naturales los más usados son las arcillas compactadas (4-6 pasadas de vibrocompactador) en la base del terreno con espesores de capa desde 20 hasta 60 cm y humedad óptima. Entre los materiales artificiales o sintéticos más utilizados para la impermeabilización destacan el hule, polietilenos, PVC y geomembrana de polietileno de alta densidad, material que de acuerdo con estudios realizados en diversos rellenos sanitarios en la Unión Americana, resulta de mayor confiabilidad. (Manual de Rellenos Sanitarios, SEDUE 1988 p.p. 126).

La aplicación de materiales geosintéticos (polietileno de alta densidad) para prevenir y controlar la contaminación del suelo y los acuíferos, es un sistema de impermeabilización eficiente que arroja resultados muy satisfactorios, que evita la contaminación al subsuelo.

Valores mínimos en propiedades físicas del Laminado de Polietileno de alta densidad.

El espesor mínimo recomendado para estos sistemas es de 40 Mills es decir 1.016 mm. La selección del espesor dependerá de las condiciones de operación, siendo su límite inferior al antes mencionado.

#### **1.2.4 Instalación de la geomembrana sobre la superficie natural**

Cuando se realiza la instalación de la geomembrana se debe tener en cuenta que el proveedor de la geomembrana deberá suministrar la ficha técnica de la del material, certificado de calidad, materiales para instalación, mano de obra calificada y equipo para una adecuada instalación.

El operador del relleno sanitario deberá entregar el terreno firme, listo para iniciar los trabajos, así como, sin protuberancias, piedras filosas y puntiagudas, ramas, lamina de agua, etc. que puedan dañar la geomembrana o afectar la adecuada instalación de la misma, incluyendo en éste trabajo los taludes.

La instalación de la geomembrana deberá ser realizada con maquina de termosellado para realizar la unión entre laminas y con maquina extrusora para hacer el sellado en partes donde la máquina de termosellado no puede acceder. Por lo general el termosellado se realiza a 550 °C y puede ser con maquina termoselladora de dos uniones o de una sola unión, este ultimo tipo de sellado se hace por lo general cuando se realiza la instalación de geomembranas de 20 y 30 Mills, para las geomembranas de mayor calibres se emplean maquinas termo selladoras de dos uniones.

Una vez instalado el material impermeabilizante, se deben llevar a cabo pruebas que confirme la adecuada unión de las laminas de geomembrana, se realizan dos tipos de prueba, la prueba de presión con aire a 30 psi, que se realiza cuando la unión entre laminas es de doble sellado y la prueba de tensión de la unión, en ambas pruebas se verifica que las uniones de las laminas de geomembrana sean correctas, no presenten fisuras y soporten cierto grado de tensión.

La geomembrana instalada debe ser anclada en el borde de los taludes, para evitar que al iniciar la disposición de material de protección y de residuos, la geomembrana se deslice dejando al descubierto partes de la celda, este sistema de anclaje puede ser de dos tipos mecánico o con zanjas excavadas perimetralmente dentro de las cuales se introducen los bordes libres de la geomembrana y luego se rellenan con tierra para pisar la geomembrana y anclarla evitando deslizamientos de esta hacia el fondo de la celda. La distancia optima para realizar las excavaciones de las zanjas para anclaje depende de la pendiente del talud y del tipo de geomembrana, este cálculo se realiza en la planilla *Instalación de geomembrana*, que se presenta como parte de esta monografía.

La profundidad y acho de la zanja para el anclaje dependen usualmente del equipo de construcción presente en la obra, por lo general se hacen las zanjas de 0.6 m de profundidad y entre 0.6 m y 0.9 m de ancho. El valor de la longitud para anclaje se calcula para proveer suficiente fricción para que la geomembrana no se deslice al fondo de la celda cuando se coloque el material de cobertura. Para este cálculo se emplea la siguiente ecuación:

$$L_A = \frac{\sigma_{at} * \text{Cos}\beta}{h' * \nu_s * \text{Tan}\delta} - K_o * \left(1 + \frac{h}{2h'}\right) + \left(1 + \frac{h}{h'}\right)$$

Donde: h = profundidad de la zanja para anclaje, en metros

h' = espesor de la tierra para cobertura de la geomembrana, en metros

$\beta$  = Angulo del talud, en grados

$\delta$  = Angulo de fricción entre la geomembrana y la tierra, en grados, generalmente este valor está entre 17° y 27°

Ko = Coeficiente de fricción del material de cobertura.

$\sigma_{at}$  = Peso de la geomembrana por unidad de área.

$\nu_s$  = Densidad del material de cobertura de la geomembrana, en kg/m3.

Una vez se instala la geomembrana se debe instalar una capa de material de cobertura para protección de la geomembrana, esta instalación de material se realiza previamente al inicio de la disposición de residuos, con el fin de proteger la geomembrana de posibles daños por el paso del equipo utilizado para compactación (buldozer, retrocargadores y camiones compactadores), se recomienda emplear arena como material de protección.

A continuación se presenta un esquema del anclaje por medio de zanjas perimetrales, seguido de una tabla con las propiedades de las diferentes geomembranas empleadas en la impermeabilización de fondo en rellenos sanitarios.

Figura No. 7 anclaje por medio de zanjas perimetrales

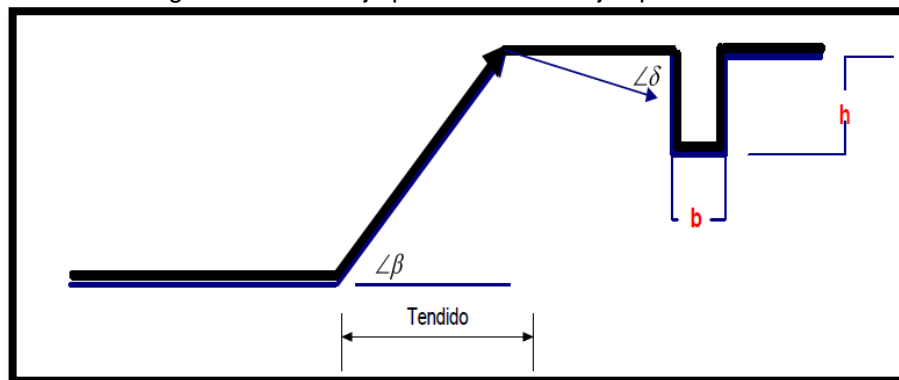


Tabla No. 1 Propiedades típicas

Propiedades	Método de prueba	Valores típicos				
Espesor en Mills	ASIM-D 1593	40	60	80	100	120
Densidad	ASIM-D 1505 A	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
Índice de fluidez	ASIM-D 1238 E	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Resistencia a la tensión (cedencia) LB/PG. De ancho	ASIM-D 638 tipo IV DUMB-BELL a 12 IPM.	95	140	190	240	290
Resistencia a la tensión (ruptura) LB/PG. De ancho	ASIM-D 638 tipo IV DUMB-BELL a 12 IPM.	160	240	320	400	480
Elongación a la Cedencia (%)	1.3" longitud de calibrador	13	13	13	13	13
Elongación a la Ruptura (%)	ASIM-D 638 Tipo IV	700	700	700	700	700
Ruptura (%)	2.0" long. Calibrador 2.52 long. Calibrador (NFS 54, mod.)	560	560	560	560	560
Resistencia al desgarramiento inicial	ASIM-D 1004 TROQUEL C	30	45	55	65	80
Fragilización a baja Temperatura °F	ASIM-D 746-B	-112	-112	-112	-122	-122
Coefficiente de expansión lineal	ASIM-D 696	1.2 x 10 <sup>-4</sup> CM/CM°C				
Resistencia al Ozono	ASIM-D 7 días 100 PPHM-AMPLIF y 104° C	Sin fracturas 7x.				
Cambio en estabilidad dimensional en cada dirección (max).	ASIM-D 1204 212 °F 1 HR.	± 2	±2	±2	±2	±2
Resistencia a la perforación. (Lbs).	ASIM-D 4833 Fims 101 Método 2065	70	108	142	175	200
Absorción de agua	ASIM-D 570	52	80	105	130	150
Resistencia hidrostática	ASIM-D 751 Método Proc. 1	8 Psi/00.001" de espesor				
Contenido de carbón (negro de humo)(%)	ASIM-D 1603 ASIM-D 3015	2-3 A1	2-3 A2	2-3 B1	2-3	2-3
Modulo de elasticidad	ASIM-D 882 PSI	110000	110000	110000	110000	110000
Estabilidad térmica con inducción de oxidación. Minutos (OIT)	ASIM-D 3865 (MIN) 130 °C 800 psi. 02.	2000	2000	2000	2000	2000
Resistencia a la fractura Por esfuerzo ambiental ESOR (hrs)	ASIM-D 1693 Método B (10 % 1gepal, 50 °C)	2000	2000	2000	2000	2000
Dimensiones	Todos los valores son aproximados					
Ancho (m)		23	23	23	23	23
Largo (m)		730	485	360	290	245
Area (m2)		16,790	11,155	8,280	6,670	5,635
Peso (Kg)		3,450	3,450	3,450	3,450	3,450

### 1.3 COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

La composición de la basura tanto física como química, se establece de acuerdo con las posibles alternativas factibles de manejo y disposición final. Esto es importante recordarlo para no caer en el error de realizar esfuerzos para obtener una información que no se utilizara posteriormente.

Existen muchas maneras de clasificar la basura, lógicamente unas mejores que otras; básicamente es necesario llegar a un acuerdo nacional e internacional para

que las soluciones y los estudios sean comparables entre distintas ciudades y entre la misma ciudad pero en diferentes tiempos.

Al igual que la producción, es importante conocer la composición por sectores ya que las características de la basura determinarían a su vez las características de la recolección y el transporte. La composición total, necesaria para las operaciones de disposición final, podrá ser obtenida mediante la integración de las composiciones parciales.

### **1.3.1 Composición física**

No existe una norma definida sobre la composición física de los residuos sólidos, pero debe adecuarse a las necesidades locales. Normalmente se estudia la composición física por porcentaje en peso.

Una clasificación física general de los desechos sólidos podría ser la consignada en los siguientes puntos que una que no es de uso general, parece ser muy apropiada.

Desechos de alimentos

Papel

Cartón

Plásticos

Textiles

Caucho

Madera

Vidrio

Metales ferrosos

Metales no ferrosos

Otros

La clasificación más utilizada actualmente en Colombia es:

Desechos de alimentos

Papel y cartón

Plásticos

Textiles

Caucho

Madera

Vidrio

Metales

ferrosos y no ferrosos

Huesos

Poda

Otros

Otro tipo de clasificación es la recomendada por la American Public Works association y que se presenta a continuación:

Empaques  
Botellas  
Metales ferrosos  
Metales no ferrosos  
Textiles  
Papel Plástico,  
cuero y caucho  
Madera y ramas  
Residuos de comida y poda  
Ladrillos, piedra y polvo.

No existen métodos oficiales de tipo estadístico para lograr una estimación de la composición física. Debido a la heterogeneidad de la basura, una muestra puntual, es decir una muestra aislada en el espacio y el tiempo no es representativo de los residuos de una población, lo cual obliga a mantener un programa continuo para determinar la producción y la composición de los residuos.

### **1.3.2 Composición química.**

El conocimiento de la composición química de los residuos sólidos es fundamental para aceptar o rechazar un tratamiento con el que puedan ser procesadas las basuras en la actualidad o en el futuro, esta información será útil si posteriormente es utilizada para planear y seleccionar adecuadamente métodos de tratamiento de los residuos.

Igual que con la composición física no existe una norma oficial para la toma de la muestra ni para efectuar los correspondientes análisis químicos. Para la toma de la muestra se puede seguir el mismo procedimiento de cuarteo explicado anteriormente, en este caso se toma una muestra de 250 kilogramos, se trituran de tal manera que pasen por un tamiz con malla de 4 centímetros y se continua el cuarteo previa homogenización hasta obtener una muestra de 2 kilogramos, los elementos que no pasen por el tamiz de 4 centímetros y que no trituren se desechan del método de selección de muestra. El proceso de toma de muestra y de trituración debe hacerse lo más rápido posible para evitar variaciones de la humedad.

Una vez preparada la muestra, se empaqueta en un depósito fuerte y se envía al laboratorio. En este se toman aproximadamente 50 gramos de muestra, se le añade un peso igual de agua destilada exenta de CO<sub>2</sub>, se agita y se determina el pH por los métodos clásicos, al excedente de la muestra se le determina la humedad y se tritura hasta que pase por un tamiz de malla de 1 milímetro, todas

las pruebas posteriores deben realizarse previo secado a peso constante.

Los análisis químicos más comúnmente utilizados son: humedad, pH, carbono, nitrógeno, fósforo, potasio y poder calorífico.

Concretamente para el diseño de incineradores, es necesario conocer el poder calorífico inferior de los residuos sólidos, que debe ser mínimo de 1000 kcal/kg para incinerar sin combustible auxiliar y de 1500 kcal/kg para poder recuperar energía.

El poder calorífico de los residuos sólidos se puede calcular en el laboratorio por los métodos clásicos, es decir convirtiendo la cantidad en peso de la basura en capacidad de producción de energía calorífica, utilizando un calorímetro adiabático como por ejemplo la bomba de Mahler o de Parró.

Para tratar la basura por métodos biológicos como el compost, es necesario conocer la relación C/N que debe ser de 10 a 25, con un alto contenido de materia orgánica para que el producto final sea de buena calidad; por la misma razón la relación DBO5/DQO debe ser aproximadamente 1.5.

El cuadro que aparece a continuación muestra la composición química de los residuos sólidos en Bogotá y Cúcuta.

Tabla No. 2 composición química de residuos

Componente	Bogota 1979	Cúcuta 1980
Humedad <%>	72	55
Carbono <%>	41	34
Nitrógeno <%>	1,6	0,7
C/N	26	49
Cenizas <%>	26	39
Potasio <%>	1,7	1,2
Pc <kcal/kg>	3391	2765
Pci <kcal/kg>	2958	2434
Fósforo <%>	**	0,5
pH en suspensión al 10 %	**	6,2
<b>Fuente: BOGOTÁ Secretaria de salud de Bogotá</b> <b>Empresa distrital de servicios publicos, estudio de aseo urbano, 1979</b> <b>CUCUTA INSFOPAL 1981</b>		
** Sin información		

## 2. GENERACIÓN Y CONTROL DE BIOGÁS.

Una vez que los residuos quedan compactados bajo capas de tierra, se va creando un ambiente libre de oxígeno que permite el desarrollo de diversos tipos de organismos anaerobios, especialmente bacterias que biodegradan la materia orgánica contenida en los residuos sólidos. En este punto es esencial tener en cuenta para que la biodegradación se presente y por lo tanto la generación de biogás, se requiere de humedad, la humedad presente en los residuos es considerable pero en algunos casos donde las temperaturas de los lugares donde están ubicados los rellenos sanitarios son altas y la precipitación anual es bastante baja, se pueden presentar producciones de biogás muy bajas, se sabe de lugares en los cuales después de años de operación del relleno sanitarios, la producción de biogás es prácticamente nula y los residuos se encuentran prácticamente sin alteraciones dentro de la celda. La descomposición progresiva de la materia orgánica implica la formación de compuestos intermedios (ácidos grasos volátiles y ácido sulfhídrico) que provocan los típicos malos olores de los residuos en descomposición. Es por ello que en el relleno sanitario deben colocarse sistemas de venteo para controlar la salida de gases y debe cuidarse que las capas de residuos sólidos queden debidamente compactadas y perfectamente cubiertas con tierra para evitar la salida desordenada de los gases nocivos al medio ambiente por sitios que no sean los sistemas de evacuación. Una biodegradación completa de los residuos sólidos ocurre cuando ésta es depositada en capas compactadas y aisladas con tierra por encima y a los lados.

A continuación se presentan una serie de factores y características más importantes en la generación, composición y control de biogás, producido en rellenos sanitarios para residuos sólidos municipales.

Tabla No.3 características generales en la composición de Biogás

Componente	Porcentaje (base volumen seco) <sup>b</sup>
Metano	45-60
Dióxido de carbono	40-60
Nitrógeno	2-5
Oxígeno	0,1-1,0
Sulfuros, disulfuros, mercaptanos, etc.	0-1,0
Amoniaco	0,1-1,0
Hidrógeno	0-0,2
Monóxido de carbono	0-0,2
Constituyentes en cantidades traza	0,01-0,6
<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Temperatura	37-67° C
Densidad específica	1,02-1,06
Contenido en humedad	Saturado
Poder calorífico superior, Kcal/m <sup>3</sup> .	890-1.223

La distribución porcentual exacta variará según la antigüedad del vertedero. Peso

molecular, densidad y peso específico de los gases encontrados en un vertedero controlado en condiciones estándar (0°C, 1 atm).

Tabla No. 4. Características de algunos componentes en un relleno sanitario

Gas	Fórmula	Peso molecular	Densidad, g/L	Peso específico, kg/m <sup>3</sup> .
Aire		28,97	1,2928	1,293
Amoniaco	NH <sub>3</sub>	17,03	0,7708	0,771
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	44,00	1,9768	1,977
Monóxido de carbono	CO	28,00	1,2501	1,250
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	2,016	0,0898	0,089
Sulfuro de hidrógeno	H <sub>2</sub> S	34,08	1,5392	1,538
Metano	CH <sub>4</sub>	16,03	0,7167	0,717
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	28,02	1,2507	1,251
Oxígeno	O <sub>2</sub>	32,00	1,4289	1,428

Nota: para un comportamiento de gas ideal, la densidad es igual a  $mp/RT$ , donde  $m$  es el peso molecular del gas,  $p$  es la presión,  $R$  es la constante de gas universal, y  $T$  es la temperatura utilizando una serie de unidades consistente.

Tabla No. 5 Constituyentes orgánicos rápido y lentamente biodegradables en los RSU

Componente de residuos orgánicos	Rápidamente biodegradable	Lentamente biodegradable
Residuos de comida	Si	
Periódicos	Si	
Papel de oficina	Si	
Cartón	Si	
Plásticos <sub>a</sub>		
Textiles		Si
Goma		Si
Cuero		Si
Residuos de Jardín	Si <sub>b</sub>	Si <sub>c</sub>
Madera		Si
Orgánicos misceláneos		Si

Los plásticos generalmente son considerados como no biodegradables.

Hojas de recorte de césped, normalmente, el 60 por 100 de los residuos de jardín son considerados como rápidamente biodegradables. Porciones leñosas de los residuos de jardín.

Tabla No. 6. Biodegradabilidad de los constituyentes de los RSU

Componente de residuos orgánicos	Contenido de lignina, porcentaje SV	Fracción biodegradable, porcentaje SV
Residuos de comida	0,4	0,82
Papel de Periódicos	21,9	0,22
Papel de oficina	0,4	0,82
Cartón	12,9	0,47
Residuos de jardín	4,1	0,72

Fracción Biodegradable = 0,83 – (0,028). LC. Donde LC = porcentaje SV (Sólidos volátiles).

Tabla No. 7 Constituyentes orgánicos en residuos

Componente	Peso húmedo <sub>a</sub> , kg	Peso seco <sub>b</sub> , kg	C	H	O	N	S	Cenizas
<b>Constituyentes orgánicos rápidamente descomponibles</b>								
Residuos de comida	9,0	2,7	1,30	0,17	1,02	0,07	0,01	0,14
Papel	34,0	32,0	13,92	1,92	14,08	0,10	0,06	1,92
Cartón	6,0	5,7	2,51	0,34	2,54	0,02	0,01	0,29
Residuos de jardín	11,1 <sub>a</sub>	4,4	2,10	0,26	1,67	0,15	0,01	0,20
<b>Total</b>	<b>60,1</b>	<b>44,8</b>	<b>19,83</b>	<b>2,69</b>	<b>19,31</b>	<b>0,34</b>	<b>0,09</b>	<b>2,55</b>
<b>Constituyentes orgánicos lentamente descomponibles</b>								
Textiles	2,0	1,8	0,99	0,12	0,56	0,08	----	0,05
Goma	0,5	0,5	0,39	0,05	-	0,01	----	0,05
Cuero	0,5	0,4	0,24	0,03	0,05	0,04	----	0,04
Residuos de jardín	7,4 <sub>a</sub>	3,0	1,43	0,18	1,14	0,10	0,01	0,13
Madera	2,0	1,6	0,79	0,10	0,69	----	----	0,02
<b>Total</b>	<b>12,4</b>	<b>7,3</b>	<b>3,84</b>	<b>0,48</b>	<b>2,44</b>	<b>0,23</b>	<b>0,01</b>	<b>0,29</b>

## 2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA GENERACIÓN DE GASES.

Las condiciones que prevalezcan en el Relleno Sanitario, constituirán un ambiente propicio para la producción del biogás, que estará directamente relacionada con el contenido orgánico, temperatura, humedad, contenido de oxígeno, tamaño de partícula, compactación y pH de los residuos sólidos municipales que ahí se confinen.

La dinámica en la composición del biogás que se genere en el sitio, cambiará debido a que se presentarán dos procesos básicos de degradación. Primero el proceso aerobio y posteriormente el anaerobio.

Estos procesos se llevan a cabo en cuatro fases: anaerobia, anaerobia no metanogénica, anaeróbica metanogénica inestable y anaeróbica metanogénica se considera que la generación de los principales gases del relleno se produce en cinco o menos fases secuenciales.

### **2.1.1 Fase I: Ajuste inicial**

La Fase I es la fase de ajuste inicial, en la que los componentes orgánicos biodegradables de los Residuos Sólidos, sufren descomposición microbiana, mientras se colocan en un relleno y poco después, en la fase I se produce descomposición biológica bajo condiciones aerobias, porque hay cierta cantidad de aire atrapado dentro del relleno. La fuente principal de organismos, ambos, aerobios y anaerobios, responsables de la descomposición de los residuos es el material del suelo que se utiliza como cobertura diaria y final. Otras fuentes de organismos son los fangos digeridos de plantas de tratamiento de aguas residuales evacuados en muchos vertederos de Residuos Sólidos, y el lixiviado reciclado.

### **2.1.2 Fase II de Transición**

En la fase II, identificada como fase de transición, desciende el oxígeno y comienzan a desarrollarse condiciones anaerobias. Mientras el vertedero se convierte en anaerobio, el nitrato y el sulfato, que puedan servir como receptores de electrones en reacciones de conversión biológica, a menudo se reducen a gas nitrógeno y sulfuro de hidrógeno. El comienzo de condiciones anaerobias se puede supervisar midiendo el potencial de oxidación/reducción que tiene el residuo. Las condiciones de reducción suficientes para producir la reducción del nitrato y del sulfato se dan aproximadamente entre  $-50$  a  $-100$  milivoltios. El metano se produce cuando los valores del potencial de oxidación/reducción están dentro del rango de  $-150$  a  $-300$  milivoltios. Mientras sigue bajando el potencial de oxidación/reducción, los miembros de la comunidad microbiana responsables de la conversión del material orgánico de los Residuos Sólidos en metano y dióxido de carbono empiezan un proceso de tres pasos, con la conversión de material complejo en ácidos orgánicos y otros productos intermedios, como se describe en la fase III. En la fase II, el PH del lixiviado, si es que esté se forma, comienza a caer debido a la presencia de ácidos orgánicos y al efecto de las elevadas concentraciones de  $\text{Co}_2$  dentro del relleno.

### **2.1.3 Fase III, Fase ácida.**

En la fase III, fase ácida, se acelera la actividad microbiana iniciada en la fase II con la producción de cantidades significativas de ácidos orgánicos y pequeñas cantidades de gas de hidrogeno. El primer paso en el proceso de tres pasos implica la transformación, mediada por enzimas (hidrólisis) de compuesto con alto peso molecular (por ejemplo, lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos) en compuestos aptos para ser utilizados por los microorganismos como fuentes de energía y de carbono celular. El segundo paso en el proceso (ácido génesis) implica la conversión microbiana de los compuestos resultantes del primer paso en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como son el ácido acético

(CH<sub>3</sub>COOH) y las pequeñas concentraciones de ácido fúlvico y otros ácidos más complejos. El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es el principal gas generado durante la fase III. También se producirán cantidades más pequeñas de gas de hidrógeno (H<sub>2</sub>). Los microorganismos implicados en esta conversión, llamados colectivamente no metanogénicos, son las bacterias anaerobias facultativas y obligadas. A menudo se identifican estos microorganismos en la literatura de ingeniería como acidogénicos o formadores de ácido.

El pH del lixiviado, si se forma, frecuentemente caerá hasta un valor de 5 o menos, por la presencia de los ácidos orgánicos y por las elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub> dentro del relleno. La demanda de bioquímica de oxígeno (DOB<sub>5</sub>), la demanda química de oxígeno (DQO) y la conductividad del lixiviado se incrementará significativamente durante la fase III debido a la disolución de ácidos orgánicos en el lixiviado, también se solubilizarán durante la fase III, algunos constituyentes inorgánicos, principalmente metales pesados, debido a los bajos valores del pH en el lixiviado. Muchos nutrientes esenciales también se separarán con el lixiviado en la fase III. Si no se recicla el lixiviado, se perderán del sistema de nutrientes esenciales. Es importante resaltar que si no se forma lixiviado, quedarán dentro del relleno productos de conversión producidos durante la fase III, como constituyentes absorbidos en el agua contenida por los residuos, como se define en la capacidad de campo.

#### **2.1.4 FASE IV Fase de fermentación del metano**

En la fase IV, la fase de fermentación del metano, un segundo grupo de microorganismos, que convierten el ácido acético y gas de hidrógeno producidos por los formadores de ácidos en la fase ácida en CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, llegan a ser más predominantes. En algunos casos estos organismos comenzarán a desarrollarse hasta el final de la fase III. Los microorganismos responsables de esta conversión son estrictamente anaerobios y se llaman metanogénicos o formadores de metano. En la fase IV la formación de metano y ácido se produce simultáneamente, aunque la velocidad de formación de ácidos es considerablemente más reducida. Como los ácidos y el gas de hidrógeno producidos por los formadores de ácidos se han convertido en CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> en la fase IV, el pH dentro del relleno subirá a valores más neutros, en el rango de 6,8 a 8. A continuación, el pH del lixiviado, si se forma, subirá, y se reducirán las concentraciones de DOB<sub>5</sub> y DOQ y el valor de conductividad del lixiviado. Con valores más altos de pH, menos constituyentes inorgánicos quedan en la disolución y, como resultado, la concentración de metales pesados presentes en el lixiviado también se reducirá.

### **2.1.5 FASE V: Fase de maduración.**

La fase V, fase de maduración, se produce después de convertirse el material inorgánico biodegradable en CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> durante la fase IV. Mientras la humedad sigue migrando a través de los residuos se convierten porciones del material biodegradable que anteriormente no estaban disponibles. Durante la fase V la velocidad de generación del gas del relleno disminuye significativamente, porque la mayoría de los nutrientes disponibles se han separado con el lixiviado durante las fases anteriores, y los sustratos que quedan en el relleno son de una degradación lenta. Los principales gases del relleno que han evolucionado en la fase V con CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. Según las medidas de sellado en el relleno, también pueden encontrarse pequeñas cantidades de nitrógeno y oxígeno en el gas del relleno. Durante la fase de maduración, el lixiviado a menudo contendrá ácidos húmicos y fúlvicos, que son difíciles de degradar biológicamente.

### **2.2 DURACIÓN DE FASES.**

La duración de las fases individuales de producción del gas en el relleno variará según la distribución de los componentes orgánicos en el relleno, la disponibilidad de nutrientes, el contenido de humedad de los residuos, el paso de la humedad por el relleno y el grado de compactación inicial. Por ejemplo, si se compactan juntos varios cargamentos de matorrales, la relación carbono/nitrógeno y el balance de nutrientes puede que no sea favorable para la producción del gas en el relleno. De forma similar, se retardará la generación del gas del relleno, si no hay suficiente humedad disponible. Incrementando la densidad del material colocado en el relleno, descenderá la posibilidad de que la humedad llegue a todas las partes de los residuos y, por lo tanto, reducirá la velocidad de bioconversión y la producción de gas.

### **2.3 CARACTERÍSTICA DEL BIOGÁS.**

Los principales componentes del biogás generado en los residuos sólidos son el metano y el dióxido de carbono, además en bajas concentraciones se tiene nitrógeno y ácido sulfhídrico; sin embargo, existen otros componentes a nivel traza que son importantes por sus posibles efectos sobre la salud humana la composición promedio del biogás detectada en sitios de disposición final de residuos sólidos. La tabla que aparece a continuación muestra las características promedio del biogás generado en un relleno sanitario.

Tabla No. 8 componentes del BIOGAS

COMPONENTE	% DEL COMPONENTE (VOLUMEN, BASE SECA)
METANO	45-60
BIOXIDO DE CARBONO	40-60
NITROGENO	2.5
OXÓGENO	0.1-1.0
HIDROCARBUROS PARAFINOS	0.1
HIDROCARBUROS AROMATICOS Y CICLICOS	0.2
HIDROGENO	0.02
ACIDO SULFHIDRICO	0.02
MONOXIDO DE CARBONO	0.02
COMPUESTOS TRAZAS	0.01-0.6
CAPACIDAD CALORIFICA	300-550
GRAVEDAD ESPECIFICA	1.04
CONTENIDO DE HUMEDAD	SATURADO
TEMPERATURA(EN LA FUENTE)	41 °C

En lo que respecta a los compuestos a nivel traza éstos provienen de dos posibles fuentes:

Los generados por el proceso de biodegradación natural que se presenta en los sitios de disposición final. En esta fuente se tiene a los siguientes grupos:

Compuestos Oxigenados.  
Compuestos de azufre.  
Hidrocarburos.

Los generados artificialmente por el hombre y que son depositados con los residuos sólidos. En esta fuente se tiene a los siguientes grupos:

Hidrocarburos Aromáticos.  
Hidrocarburos clorados

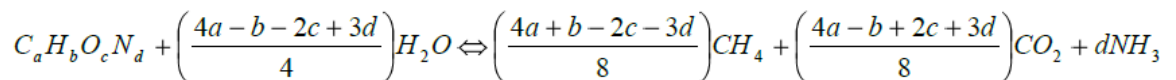
La existencia de materiales orgánicos volátiles en el biogás, obliga a que en el relleno sanitario se tenga un control eficiente del mismo, para evitar problemas de salud a los operarios y molestias por los olores desagradables a la población circundante.

### 2.3.1 Volumen de Biogás

La estimación del volumen de biogás que se generará en el sitio en estudio, es muy difícil de calcular, debido a que actualmente se cuenta con métodos teóricos,

que en ocasiones manejan constantes que han sido determinadas experimentalmente con residuos sólidos con características muy diferentes a los residuos que se generan en nuestro país. Primeramente, es posible determinar el volumen de biogás potencial a generarse por unidad de peso de residuos sólidos, usando para ello la estequiometría correspondiente a una digestión anaerobia como la siguiente:

usando para ello la estequiometría correspondiente a una digestión anaerobia como la siguiente:



Sin embargo, los resultados que se obtienen con esta técnica no son reales dado que se consideran productos en los mismos residuos tales como lignina, celulosa y grasa que no se biodegradan completamente, aun así este método constituye una línea de tendencia y una aproximación a la producción real de gas en un relleno sanitario.

Por otra parte, es conocido que la tasa de producción del biogás varía con el tiempo, por lo que el método estequiométrico requiere de la ayuda de la cinética de reacción, no obstante que la producción de éste continúa por varias décadas, haciéndose difícil la predicción del mismo. Con base en ese método fue posible estimar la producción de biogás utilizando la metodología del Modelo de Producción de Biogás Triangular propuesto por G. Tchobanoglous (1994), el cual considera como base de cálculo la fracción orgánica de los residuos sólidos: la parte altamente degradable (residuos alimenticios, residuos de jardinería < 60% >, papel, cartón etc.), y la parte moderadamente degradable (madera, residuos de jardinería < 40% >, textiles, etc.).

En primer lugar se asume que el punto máximo de producción de biogás se alcanza en el primer año y se considera un período 5 años de producción de biogás, siguiendo un comportamiento triangular. También se asume en este caso una manera ilustrativa una composición de los residuos y con esta se calcula la fórmula química de los residuos sólidos que se van a disponer en el relleno sanitario. En el caso de la fracción moderadamente degradable, el pico máximo de producción se considera que se alcanza en los primeros cinco años y la duración del proceso es de 15 años teóricamente. Ahora bien, el área bajo la curva generada, corresponde al volumen total de biogás producido. Para calcular la producción de biogás por tipo de residuos según su biodegradabilidad. Tchobanoglous (ref. citada) llega previamente a dos ecuaciones estequiométricas, en las que el término de la izquierda corresponde a la composición química teórica del grupo de residuos en cuestión:

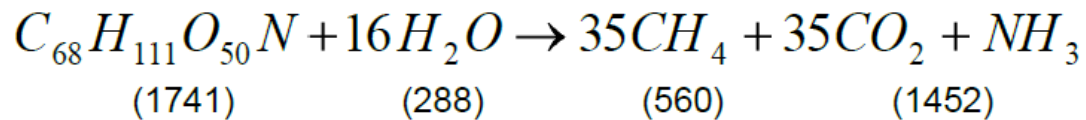
Para mostrar el modo en que se realizan los cálculos se asumen las composiciones de los residuos, el peso de los residuos se toma en base húmeda motivo por el cual se debe corregir el resultado llevándolo a base seca. Más adelante se muestra la manera de realizar el cálculo.

Se presenta un ejemplo de cálculo tomado del libro INTEGRATED SOLID WASTE MANAGEMENT, ENGINEERING PRINCIPLES AND MANAGEMENT ISSUES.

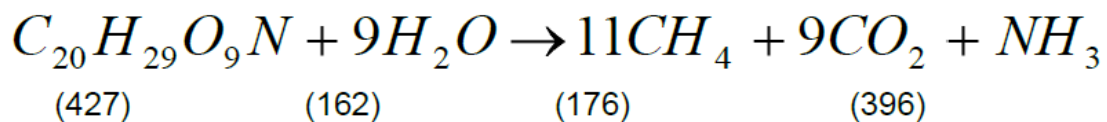
En el ejemplo se distinguen dos tipos de residuos, los de rápida degradación y los de lenta degradación, es evidente que la velocidad a la cual los residuos se degradan no es exactamente la misma, por ejemplo, los residuos de comida se degrada a una mayor velocidad que los residuos de podas de jardines, el elevado contenido de celulosa de estos últimos hace que el proceso de degradación sea más demorado que en el caso de los primeros.

La manera de determinar la formula mínima o empírica promedio de los residuos dispuestos dependerá de la composición física y química de estos, si se conoce esta distribución se puede determinar la formula mínima de los residuos, en este ejemplo se parte de una composición conocida, la planilla *Biogás* calcula la formula mínima de los residuos a partir de la composición física de estos y de una composición química promedio de los residuos analizados según la clasificación planteada en la planilla.

Residuos rápidamente degradables



Residuos lentamente degradables:



Considerando la densidad del metano y el bióxido de carbono ( $\delta_{CH_4} = 0.72$  g/L y  $\delta_{CO_2} = 1.98$  g/L), y de acuerdo con las ecuaciones estequiometrias anteriores, se tiene que, la producción de biogás de los residuos de rápida degradación es

$$\frac{560g CH_4}{1741g RSDR \left( \frac{0.72g CH_4}{1 CH_4} \right)} = 446.7 \frac{l CH_4}{kg RSDR}$$

$$\frac{1452g CO_2}{1741g RSDR \left( \frac{1.98g CO_2}{1 CO_2} \right)} = 421.2 \frac{l CO_2}{kg RSDR}$$

RSDR: Residuos sólidos de Degradación Rápida.

$$\text{Para un total de } 446.7 \frac{l CH_4}{kg RSDR} + 421.2 \frac{l CO_2}{kg RSDR} = 867.9 \frac{l biogas}{kg RSDR}$$

Para los residuos de lenta degradación.

$$\frac{176g CH_4}{427g RSDL \left( \frac{0.72g CH_4}{1 CH_4} \right)} = 572.5 \frac{l CH_4}{kg RSDL}$$

$$\frac{396g CO_2}{427g RSDL \left( \frac{1.98g CO_2}{1 CO_2} \right)} = 468.4 \frac{l CO_2}{kg RSDL}$$

RSDL: Residuos sólidos de Degradación Lenta.

$$\text{Para un total de } 572.5 \frac{l CH_4}{kg RSDL} + 468.4 \frac{l CO_2}{kg RSDL} = 1049.9 \frac{l biogas}{kg RSDL}$$

Al multiplicar estos valores por la fracción en base seca de los residuos y por el porcentaje de la materia que efectivamente se biodegrada, (Tchobanoglous) obtiene valores más reducidos de generación real de biogás. De esta manera se tiene que:

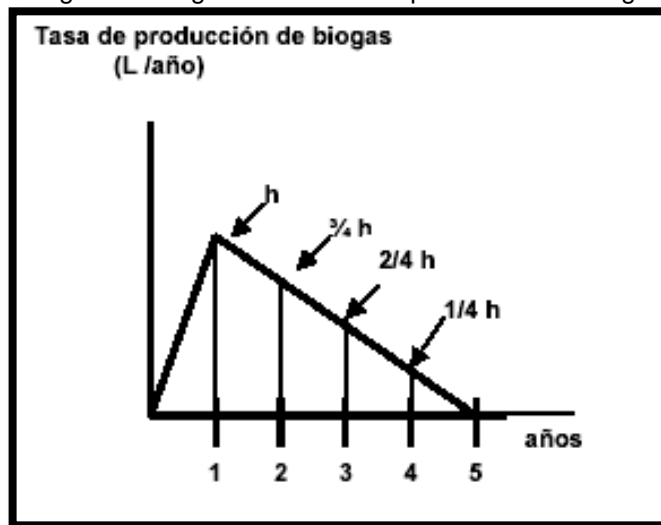
$$0.448 * 0.75 * 867.9 \frac{l \text{ biogas}}{kg \text{ RSDR}} = 291.61 \frac{l \text{ biogas}}{kg \text{ RSDR}}$$

$$0.073 * 0.5 * 1049.9 \frac{l \text{ biogas}}{kg \text{ RSDL}} = 38.32 \frac{l \text{ biogas}}{kg \text{ RSDL}}$$

Nota: 0.448 y 0.73 es la fracción en base seca, y 0.75 y 0.50 es la fracción de la materia que efectivamente se biodegrada, para los residuos biodegradables rápidos y lentos, respectivamente en cada caso.

Para estimar la producción de biogás con respecto al tiempo para los residuos rápidamente degradables (producción máxima al final del primer año de operación del relleno sanitario y terminación a los cinco años), se emplea el método de distribución triangular el cual se esquematiza en la siguiente figura:

Figura No. 8 tasa de producción de biogás



La producción de biogás es igual al área bajo la curva A que corresponde a la cantidad de biogás generado por cada kilogramo de residuos, y se calcula de la siguiente manera:

$$A = \frac{1}{2} * b * h$$

Donde: b = intervalo de tiempo para el cual se realiza el cálculo de biogás producido. h = cantidad máxima de biogás generada por cada kilogramo de residuos sólidos en un año. Ya que el valor de A es conocido (291.61 L biogás / kg residuo para este ejemplo) y que el análisis se realiza para un periodo de tiempo de 5 años, se tiene entonces que la tasa pico de producción, ocurrirá al final del primer año de operación y será:

$$h = \frac{2 * A}{t} = \frac{2 * 291.61}{5} = 116.6 \frac{l \text{ biogás}}{kg \text{ RS} * \text{año}}$$

Una vez conocido el valor de h, es posible determinar la producción de gas en cada año mediante el cálculo de las áreas parciales en la figura anterior. Así, para el primer año, la producción de gas será:

$$A_1 = \frac{1}{2} * b * h = \frac{1}{2} * 1 \text{ año} * 116.6 \frac{l \text{ biogás}}{kg \text{ RS} * \text{año}} = 58.322 \frac{l \text{ biogás}}{kg \text{ RS}}$$

La segunda área será igual al área del rectángulo mas el área del triangulo, sabiendo que el rectángulo tiene una altura de 0.75h y el triangulo una altura de 0.5h.

$$A_2 = b * 0.75 * h + \frac{1}{2} * b * 0.25h$$

$$A_2 = \left( 1 * 0.75 * 116.6 \frac{l \text{ biogás}}{kg \text{ RS} * \text{año}} \right) + \left( 0.5 * 1 * 0.25 * 116.6 \frac{l \text{ biogás}}{kg \text{ RS} * \text{año}} \right) = 102.025 \frac{l \text{ biogás}}{kg \text{ RS}}$$

Y así sucesivamente

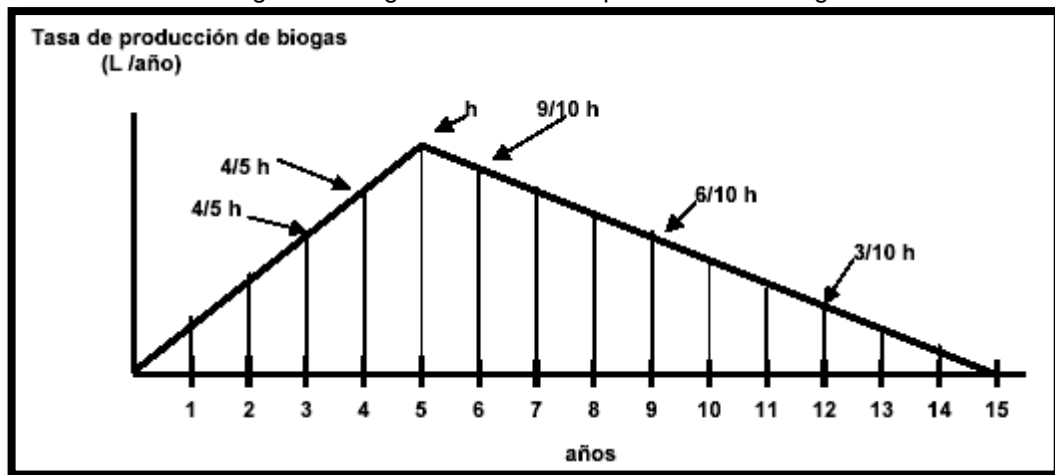
$$A_3 = 1 * 0.5 * h + \frac{1}{2} * 1 * 0.25h$$

$$A_4 = 1 * 0.25 * h + \frac{1}{2} * 1 * 0.25h$$

$$A_5 = \frac{b * 0.25 * h *}{2}$$

Ahora bien, los residuos que se degradan con lenta velocidad, el modelo simplificado de la cinética de generación considera que la tasa de producción máxima ocurre a un tiempo  $t=5$  años, en tanto que la producción decae paulatinamente hasta un valor de cero al año 15 después de que fueron confinados los residuos. En estas condiciones, la siguiente figura explica el modelo.

Figura No. 9 tasa de producción de biogás



La tasa máxima de producción de biogás ocurre al año 5. Si la producción total de biogás es igual al área bajo la curva, entonces su valor se determina mediante la relación:

$$A = \frac{1}{2} * b * h$$

De donde, el valor de  $h$ , será igual a:

$$h = \frac{2 * A}{t} = \frac{2 * 38.32}{5} = 15.328 \frac{l \text{ biogás}}{kg \text{ RS} * \text{año}}$$

De esta manera, y resolviendo para cada área particular del triángulo como se hizo en el caso anterior, se tiene que:

$$A_1 = \frac{1}{2} * b * \left( \frac{1}{5} * h \right) = \frac{1}{2} * 1 \text{ año} * 0.2 * 15.328 \frac{l \text{ biogás}}{kg \text{ RS} * \text{año}} = 1.5328 \frac{l \text{ biogás}}{kg \text{ RS}}$$

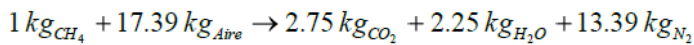
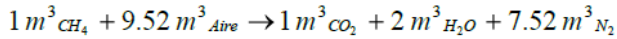
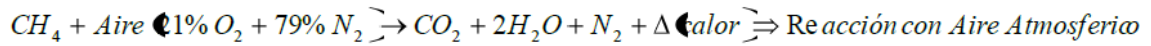
$$A_2 = b * \left( \frac{1}{5} * h \right) + \frac{1}{2} * \left( \frac{1}{5} * h \right)$$

$$A_2 = 1 * 0.2 * 15.328 \frac{l \text{ biogás}}{kg \text{ RS} * \text{año}} + \left( 0.5 * 0.2 * 15.328 \frac{l \text{ biogás}}{kg \text{ RS} * \text{año}} \right) = 4.5984 \frac{l \text{ biogás}}{kg \text{ RS}}$$

Y así sucesivamente. Existen diferentes metodologías para establecer la distribución de la generación de biogás en un relleno sanitario, todas planteadas y probadas para rellenos sanitarios construidos en otros países diferentes a Colombia, debe tenerse en cuenta que aun que los residuos se encuentran bajo tierra, las variaciones de temperaturas exteriores o del ambiente circundante debidas a la posición geográfica de los países hacen varias las tasas de degradación y producción de biogás, también la composición misma de los residuos varia de un lugar a otro lo que hace que sea cual sea la metodología que se aplique, deba ser verificada y el modelo de distribución deba ser calibrado.

De acuerdo con estas estimaciones y suposiciones de distribución de producción, la mayor producción de biogás se da durante los primeros cinco años después de iniciada la disposición final de residuos en el relleno sanitario. De ahí que para proyectos donde se plantea aprovechar el biogás sea muy importante considerar estos años útiles. Aun y cuando algunos sitios de disposición muestran una producción muy marcada de biogás 10 o más años después de que se depositaron residuos en ellos. Cabe señalar que, en caso de requerirse la determinación de las tasas de generación de biogás para un tiempo determinado, estas pueden obtenerse calculando el valor de la fracción de "h" correspondiente. Basado en la anterior metodología se planteo la realización de la hoja de cálculo para la determinación de la cantidad de residuos sólidos que se pueden producir en un relleno sanitario, siempre y cuando se conozca la composición física y química de los residuos sólidos.

El potencial energético del metano presente en el biogás generado en el relleno sanitario, está determinado por su poder calorífico intrínseco, evidentemente este poder calorífico se aprovecha por la combustión del metano, la reacción de combustión del metano es la siguiente:



La anterior es la representación de la ecuación de combustión del metano, la primera es la reacción estequiométrica con oxígeno puro y la segunda es la reacción con aire atmosférico, la temperatura de la llama producida por la combustión del metano depende de la cantidad de aire en la reacción dado que generalmente no se realiza esta reacción con oxígeno puro. Algunas propiedades del metano son:

Metano, Fórmula: CH<sub>4</sub>

Densidad: 0.714 kg/m<sup>3</sup>

Calor de Combustión (PCI): 13280 Kcal/m<sup>3</sup>, 9485 Kcal/m<sup>3</sup>

La temperatura de llama de la combustión del metano se puede calcular con la fórmula que aparece a continuación.

$$^{\circ}C = \frac{PCI}{0.31 * (+ 13 * 10^{-4} * n * PCI)}$$

En esta ecuación (n) es el coeficiente de exceso de aire utilizado en la reacción de combustión.

## 2.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE BIOGÁS.

La migración de gases desde los sitios de disposición final de residuos sólidos municipales, hacia sus alrededores, constituye un problema serio en varias comunidades, ya que el metano, que es el componente combustible del biogás, puede acumularse en ductos, cimientos o espacios cerrados de las estructuras cercanas a estos sitios de disposición final. Dichas acumulaciones de metano pueden provocar combustión en presencia de oxígeno y en ocasiones explotar, causando pérdidas humanas y materiales a las comunidades cercanas o a la infraestructura instalada en las áreas vecinas y aún a la infraestructura de apoyo del mismo sitio de disposición que esté generando las emisiones de biogás.

En Colombia existe el REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO, RAS – 2000, SECCION II, TÍTULO F, SISTEMAS DE ASEO URBANO, el cual establece:

### 2.4.1 Drenaje de gases

1. Drenaje de gases para los **niveles bajo y medio de complejidad**. El drenaje de gases debe estar constituido por un sistema de ventilación en piedra o tubería perforada de concreto revestida en piedra, que funcione como chimeneas, las cuales atraviesan en sentido vertical todo el relleno desde el fondo hasta la superficie. Las chimeneas deben estar construidas verticalmente a medida que avanza el relleno, logrando una buena compactación a su alrededor.

Se recomienda instalarlas cada 50 m, con un diámetro entre 0.30 y 0.50 m cada una.

Deben interconectarse los drenes, a fin de lograr una mayor eficiencia en el drenaje de líquidos y gases en el relleno sanitario.

Cuando se tenga previsto finalizar la última celda, deben colocarse dos tubos de concreto: el primero, perforado y revestido en piedra para facilitar la captación, salida de gases y evitar la obstrucción de los orificios ya sea por los residuos sólidos o por el material de cobertura. La segunda tubería no es perforada, a fin de coleccionar el gas y quemarlo, eliminando los olores producidos por otros gases.

### 2. Drenaje de gases para los **niveles alto y medio alto de complejidad**

La eliminación de los gases puede realizarse mediante los siguientes procedimientos:

a) Para permitir la libre evacuación de los gases de la masa de residuos de cada módulo, deben colocarse chimeneas, mínimo cuatro por hectáreas y no menos de una por módulo. Deben ubicarse en la mayor cota final del módulo relleno y cubierto. Este procedimiento debe realizarse para rellenos tipo área. Para rellenos tipo trinchera, las chimeneas deben ubicarse cada 20 m o 50 m.

b) Cuando sea necesario evitar que el gas se difunda lateralmente a través del terreno y pueda llegar a zonas cercanas deben interponerse barreras de venteo lateral entre la zona de relleno y aquellas que deben protegerse, estableciendo un sector de mayor permeabilidad que el terreno por donde el gas pueda evacuarse hacia la atmósfera con facilidad, mediante zanjas longitudinales de profundidad igual a la del relleno sanitario, hechas en el terreno natural y ubicadas perimetralmente al relleno. El ancho debe ser de 0.6 m; las zanjas son rellenas con grava, piedra partida o material similar y cubiertas con una capa de tierra de 0.30 m de espesor. Deben colocarse tuberías de 0.15 m de diámetro con orificios laterales, que penetren 1.50 m en la masa de piedra partida y el manto de cobertura; se colocaran cada 20 m y deben sobresalir 2.0 m sobre la superficie del terreno llevando en su extremo superior una pieza en T de 0.15 m de diámetro. En la superficie lateral de la zanja opuesta a la zona del relleno, cuando el coeficiente de permeabilidad es mayor que  $10^{-6}$  cm/s, se colocará una película de polietileno (200-250 micrones).

### 3. GENERACIÓN Y CONTROL DE LIXIVIADOS

Los lixiviados son líquidos altamente contaminantes que se producen como resultado de la percolación del agua a través de los residuos sólidos confinados y también por el metabolismo generado por microorganismos presentes en los residuos dentro del relleno sanitario, y potencialmente pueden impactar la calidad del agua subterránea, ya sea mantos freáticos o acuíferos, el líquido lixiviado, contiene una cantidad importante de sólidos suspendidos y disueltos, debido a reacciones químicas y bioquímicas, produciéndose inclusive gases como el metano (CH<sub>4</sub>) bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y amoníaco (NH<sub>3</sub>), se estima que aun cuando se controle el ingreso de agua pluvial, existirá generación de lixiviados debido a la liberación del agua contenida en los mismos residuos confinados y la generada por actividad microbiana.

La composición típica de los lixiviados es variable y dependerá del tipo y composición de los residuos a confinar

La grafica que aparece a continuación presenta los principales factores que intervienen en la generación o producción de lixiviados dentro de una celda de un relleno sanitario.

Tabla No.9 Factores que intervienen en la producción de lixiviado

FACTORES	ELEMENTOS	
Infiltración de agua	Precipitación pluvial  Cobertura de los residuos sólidos municipales	-Ubicación geográfica. -época del año / aspectos climatológicos.  -Evaporación/evapotranspiración  -Espesor impermeabilidad -Tipos de materiales -Compactación -Pendientes.
Característica de los residuos	Tipología	<b>Composición</b> Orgánica Inorgánica <b>Compuestos contaminantes</b> Humedad <b>Capacidad de absorción</b> Tamaño y grado de compactación
Actividades microbianas	Actividades aerobias, anaerobias	-Naturaleza de los materiales -Temperatura -Relación carbono/nitrógeno -Potencial de hidrogeno (Ph) -Contenido de sustancias tóxicas.
Operación del relleno	Eficiencia operativa	-Bermas temporales -Obras de desvío de aguas -Cobertura diaria de los residuos sólidos municipales
Intrusión de aguas subterráneas	Eficiencias constructivas	-Impermeabilización adecuada

Como se puede ver en el cuadro dentro de los factores que afectan la producción de lixiviado esta la adecuada manipulación o evacuación de aguas de escorrentía, debido a que si se permite que toda el agua lluvia circule sobre el área ocupada por el relleno sanitario, se aumenta la probabilidad de infiltración de agua dentro de los residuos y por lo tanto se incrementa la cantidad de lixiviado generado.

La canalización de las aguas de escorrentía que circulan sobre la celda y sus alrededores es fundamental para reducir la producción de lixiviado, todas las aguas de escorrentía deben ser evacuadas del relleno sanitario, por medio de la construcción de canales.

Generalmente los rellenos sanitarios no están ubicados sobre rutas de drenaje natural, la precipitación que cae sobre el relleno sanitario debe ser dirigida a rutas de drenajes naturales.

El diseño de canales para aguas lluvias se basa en la hidráulica de canales abiertos, es posible que se requiera de una o más líneas de canales para realizar la evacuación del agua de escorrentía. Lo principal en estos casos es determinar el caudal de agua que debe ser transportado por cada canal.

La ecuación de Manning es empleada para el diseño de la sección del canal.

$$V = \frac{1}{n_r} * r_h^{2/3} * S^{1/2}$$

En esta ecuación:

V = Velocidad media del agua en el canal, en m/s

rh = radio hidráulico del canal, en metros

s = Pendiente del cana, expresada como fracción.

nr = Coeficiente de rugosidad, adimensional, depende del material de construcción del canal.

La mayor dificultad para aplicar la ecuación de Manning es la elección del valor correcto del coeficiente de rugosidad del canal, por lo general los canales para manejo y evacuación de aguas de escorrentía son construidos con secciones trapezoidales y triangulares, en el diseño de todos los canales se realiza un procedimiento de ensayo y error para encontrar las dimensiones de la sección transversal, en la mayoría de los casos se selecciona un valor de pendiente, un material de construcción del canal y se realiza el procedimiento de ensayo y error hasta llegar al valor de caudal deseado que se requiere transportar en el canal. Las siguientes graficas muestran la forma de los canales típicos para manejo y evacuación de aguas de escorrentía en rellenos sanitarios.

Figura No. 10 Canal de sección triangular

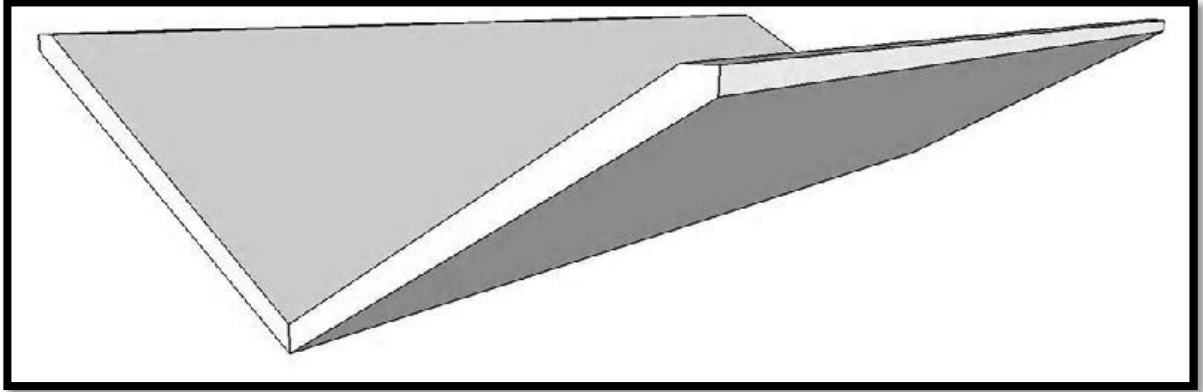
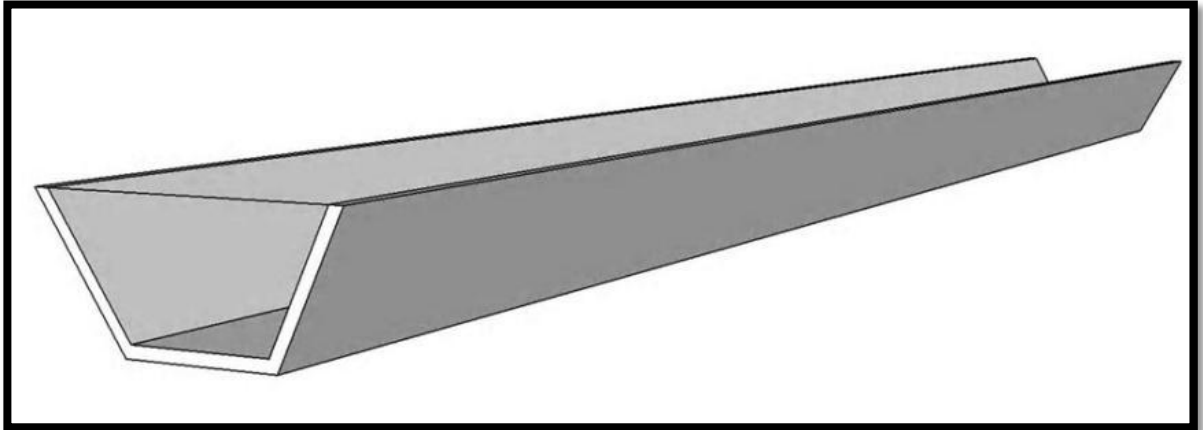


Figura No.11. Canal de sección trapezoidal.



### 3.1 GENERACION DE LIXIVIADOS

Para la estimación de la generación de lixiviados se han desarrollado diversos modelos matemáticos, estos parten del análisis del balance hídrico de un volumen de control correspondiente al área de relleno sanitario, existen diferencias entre los modelos aplicados que se caracterizan por el uso de diferentes factores de generación, a continuación se presenta un gráfico en el que se enumeran los principales modelos para calcular la producción de lixiviados en el relleno sanitario.

Tabla No.10 Modelos para el cálculo de lixiviados

MODELO	CARACTERISTICAS
Thornthwaite (Fenn)	Observaciones empíricas de periodo de tiempo por etapas del relleno sanitario, se apoya en datos climatológicos. No toma en cuenta las actividades microbianas. No toma en cuenta la posible intrusión de agua subterránea.
Método HELP	Es un modelo determinístico, cuasi-bidimensional se basa en información climatológica, edafológica, de diseño y geohidrológica.  Desarrolla un balance hídrico lateral y vertical.
Método de balance de agua	Es un modelo determinístico Se basa en información climatológica, la cantidad de humedad de los residuos, la cantidad microbiana, el suelo y material de cobertura, la época del año.

En la disposición de residuos sólidos dentro del relleno sanitario suceden fenómenos complejos de interacciones entre los constituyentes de los residuos, las aguas de lluvia que se infiltran entre la masa de los residuos y, finalmente, el sustrato constitutivo del sitio.

Una descarga de residuos debe ser considerada como un medio en constante evolución, lugar de reacciones fisicoquímicas y biológicas. Entre los mecanismos que intervienen, hay que citar

- 1) Las reacciones fisicoquímicas responsables de la solubilización, precipitación, óxido-reducción, intercambio iónico o de gases de algunos materiales contaminantes.
- 2) Las reacciones de degradación biológica de materiales disueltos y suspendidos que se efectúan por vía aerobia o anaerobia según las condiciones del medio.

Las consecuencias directas de estas transformaciones son la liberación de gas y la formación de lixiviados. Los componentes del agua que se necesitan considerar para evaluar la producción de lixiviado en un relleno sanitario son la precipitación pluvial, el escurrimiento superficial, la evaporación y almacenamiento de agua por el suelo. También, el suelo que rodea al sitio de relleno tiene una gran influencia sobre la formación de lixiviados, principalmente por su naturaleza, y más concretamente su litología y su concentración en materias orgánicas y en organismos vivos.

Se debe destacar la importancia relevante de las características hidrogeológicas de los sitios, en cuanto a la posibilidad de escurrimiento y dilución de los lixiviados. La contaminación que puede resultar de la migración de los lixiviados depende:

De la capacidad de retención de la zona no saturada de agua, respecto a la

cantidad global de contaminación liberada, en el seno de esta formación la mayor parte de la contaminación acarreada por los lixiviados se elimina por los siguientes procesos:

Físicos: filtración y retención capilar; bioquímicos: biodegradación; y Químicos: precipitación y co-precipitación, intercambios iónicos y adsorciones.

Paralelamente a estos procesos estrictos de atenuación de los lixiviados, se desarrollan un conjunto de fenómenos químicos complejos que son particularmente importantes en la atenuación de compuestos inorgánicos, pero también pueden solubilizar otros compuestos; se puede citar como ejemplo las reacciones ácido-base y las reacciones de óxido-reducción. De la capacidad de dilución y dispersión de la zona saturada de agua. La migración y la atenuación del penacho de contaminación están regidas por la combinación de varios factores que son la dilución del lixiviado al mezclarse con agua del manto, la dispersión de las sustancias en solución en el agua, los intercambios físicos con el medio y las reacciones químicas y bacteriológicas.

Finalmente, los procesos bioquímicos que tienen lugar en la estabilización de la materia orgánica de los residuos sólidos y en el aceleramiento de la velocidad de reacción de los procesos geoquímicos sobre sustancias inorgánicas, juegan un papel en la solubilización de contaminantes en las aguas percoladas.

Como conclusión, se puede establecer que los modelos empleados a escala mundial y localmente para determinar la generación de lixiviados han demostrado márgenes de error importantes en cuanto a los volúmenes generados, las variaciones técnicas definidas por los métodos utilizados y la generación real según algunos investigadores por el método de balance de agua son del orden entre 83 al 154 %, para el método Help, los márgenes de error encontrados fueron de entre -96 a + 449 % (Peyton & Schroeder 1988).

### **3.1.1 Cálculo de la generación de lixiviados**

El volumen de lixiviado está fundamentalmente en función de la precipitación pluvial. No solo la escorrentía puede generarlo, también las lluvias que caen en el área del relleno hacen que su cantidad aumente, ya sea por la precipitación directa sobre los residuos depositados o por el aumento de infiltración a través de las grietas en el terreno. Debido a las diferentes condiciones de operación y localización de cada relleno, las tasas esperadas pueden variar; de ahí que deban ser calculadas para cada caso en particular.

Dado que no siempre resulta fácil obtener información local sobre los datos climatológicos, se suelen utilizar coeficientes que correlacionan los factores antes mencionados con el fin de precisar el volumen de lixiviado producido. El método

suizo, por ejemplo, permite estimar de manera rápida y sencilla el caudal de lixiviado o líquido percolado mediante la ecuación:

$$Q = \frac{P * A * K}{t}$$

Q=Caudal medio de lixiviado o líquido percolado (L/s)

P = Precipitación media anual (mm/año)

A = Área superficial del relleno (m<sup>2</sup>)

t = Número de segundos en un año (31.536.000 s/año)

K = Coeficiente que depende del grado de compactación de la basura, cuyos valores recomendados son los siguientes:

Para rellenos débilmente compactados con peso específico de 0,4 a 0,7 Ton/m<sup>3</sup>, se estima una producción de lixiviado entre 25 y 50% (k = 0,25 a 0,50) de precipitación media anual correspondiente al área del relleno.

Para rellenos fuertemente compactados con peso específico > 0,7 t/m<sup>3</sup>, se estima una generación de lixiviado entre 15 y 25% (k = 0,15 a 0,25) de la precipitación media anual correspondiente al área del relleno

Esta es una de las metodologías de cálculo de producción de lixiviados en rellenos sanitarios, pero es bastante general y deja a un lado algunos aspectos relativos a la capacidad de los residuos de absorber agua (capacidad de campo), por este motivo en el presente trabajo se emplea una metodología en la cual interactúan distintos parámetros que afecta la generación de lixiviado en un relleno sanitario.

En el método que se utilizara para determinar la velocidad de producción de lixiviados en un relleno sanitario se requiere de la siguiente información:

Periodo de relleno de residuos, se refiere al tiempo de operación del relleno sanitario. En días.

Superficie requerida por día, referido a la superficie de o área sobre la cual se disponen los residuos diariamente, expresada en m<sup>2</sup>, <Ar>

Residuos colocados por día. Expresado en kg/día, <Rd>

Residuos colocados por año. En kg/año, <Ra>

Peso específico compactado de residuos, se refiere a la densidad esperada de los residuos dispuestos después de compactados en la celda, generalmente se emplea un valor de 0.85 ton/m<sup>3</sup> = 850 kg/m<sup>3</sup>. <prc>

Contenido de humedad de residuos, el rango de esta variables está entre 20 % en masa – 50 % peso masa. <%H>

Peso específico del suelo de cobertura, depende del tipo de suelo un valor que se puede tomar entre 1400 kg/m<sup>3</sup> y 1800 kg/m<sup>3</sup>, <ρ<sub>s</sub>>

Agua consumida en la formación de gas, este dato se determina de la estequiometría de la degradación anaerobia de la materia orgánica presente en los residuos dispuestos. Masa de agua consumida por metro cúbico de residuos dispuesto, <kg/m<sup>3</sup>>

Peso específico del gas, este valor depende de la temperatura de salida del gas que en promedio está entre 40 y 70 °C, el valor de este peso específico oscila entre 1.2 y 1.4 kg/m<sup>3</sup>. <ρ<sub>g</sub>>

Relación de residuos, 1:5 0.2/ 1-0.2 = 0.8, es decir que por cada metro de altura de residuos en la celda, 80 centímetros estarán ocupados por basura y los otros 20 serán material de cobertura. <r>

Precipitación de lluvia que cae sobre el piso relleno, date que se debe establecer por fuentes meteorológicas, se expresa en mm/m<sup>2</sup>/año. <P>

Altura de la capa al final del primer año. En otros términos es la altura alcanzada de los residuos y el material de cobertura al final del año de operación, expresada en m. (Promedio). <h>

### **Ejemplo de cálculo.**

Los cálculos se inician al final del año 1, para el cual se espera que la altura de residuos en la celda sea de X metros, se toma como base para los cálculos 1 m<sup>2</sup> de celda y 1 kg de residuos dispuestos.

**Año 1** La altura de residuos al final del primer año de operación es de 4 metros.

*a) Peso del material de cubierta de los residuos al final del año de operación.*

$$M_c = \rho_s * h * r * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2$$

A manera de ejemplo, tomando una densidad del material de cobertura de 1465 kg/m<sup>3</sup>, para un periodo de operación de 1 año, una relación Residuos/cobertura de 1/3, para 1 m<sup>2</sup> de superficie sobre la celda y una altura de residuos dispuestos de 4 m.

$$M_c = 1770 \frac{kg}{m^3} * \frac{1}{5} * 1 \text{ año} * 1 m^2 * 5 m = 1770 kg$$

b) Peso de residuos.

$$M_r = \rho_r * h * (1 - r) * 1 \text{ año} * 1 m^2$$

$$M_r = 800 \frac{kg}{m^3} * \left(1 - \frac{1}{5}\right) * 1 \text{ año} * 1 m^2 * 5 m = 3200 kg$$

$$M_t = M_c + M_r = 1700 kg + 3200 kg = 4900 kg$$

c) Peso de los residuos secos, asumiendo que el % de humedad de los residuos es del 20%.

$$M_{rs} = M_r * \left(1 - \frac{\%H}{100}\right) = 3200 * \left(1 - \frac{20}{100}\right) = 2560 kg$$

d) Contenido de humedad en los residuos (20% masa).

$$M_{hr} = M_r * \frac{\%H}{100} = 3200 * \frac{20}{100} = 640 kg$$

Peso del agua de escorrentía que ingresa en la celda, en este ejemplo se supondrá que después de realizado el balance hídrico la cantidad de agua que ingresa en la celda es de 150 mm/m<sup>2</sup>/año.

$$M_{ap} = P * 1 m^2 * \rho_{agua} = 150 \frac{mm}{m^2 * \text{año}} * \frac{1 m}{1000 mm} * 1 m^2 * 1000 \frac{kg}{m^3} = 150 kg$$

Masa total dispuesta sobre 1 m<sup>2</sup> de celda, durante un año

$$M_{tc} = M_c + M_r + M_{ap} = 1700 kg + 3200 kg + 150 kg = 5050 kg$$

Antes de calcular el factor de campo se debe hacer el cálculo de la cantidad de agua presente en los residuos, lo cual se hace de la siguiente manera:

$$M_{AR} = M_{hr} + M_{ap} = 640 \text{ kg} + 150 \text{ kg} = 790 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Para calcular el peso medio de residuos dispuestos (W) en la celda se aplica la siguiente ecuación.

$$W = \frac{M_{rs} + M_{AR}}{2} + M_c = \frac{2560 \text{ kg} + 790 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 3445 \text{ kg}$$

Calculo del factor de campo de los residuos. Es la capacidad de retención de humedad de los residuos expresada como fracción. \*CC

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{3445}{4536 + 3445} = 0.3625$$

e) Conocida la capacidad de campo se determina la masa de agua que puede ser retenida por los residuos secos.

$$A_{rrs} = FC * M_{rs} = 0.3625 * 2560 \text{ kg} = 928.23 \text{ kg}$$

f) Lixiviados producidos, la cantidad de lixiviado generado depende de la cantidad de agua que se infiltre en la celda y la cantidad de agua que puede ser retenida por los residuos. Lixiviado producido por la precipitación que satura la masa de residuos dispuestos

$$\text{Lixiviado} = M_{AR} - A_{RRS} = 790 \text{ kg} - 928.23 \text{ kg} = -138.23 \text{ kg}$$

Los resultados negativos indican que no hay generación de lixiviado, al contrario, los residuos dispuestos son capaces de retener una cantidad superior de agua, es

decir son capaces de absorber 138.23 kg de agua, Cuando la cantidad de Lixiviado es menor o igual que cero significa que los residuos en la celda pueden retener mayor humedad y por lo tanto no se presenta generación de lixiviado, cuando el valor de Lixiviado es mayor que cero es porque los residuos no son capaces de absorber más agua y por lo tanto se presenta la generación de lixiviado.

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{AR} = 790 \text{ kg}$$

Peso total en la celda

$$M_{TC} = M_c + M_{AR} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 790 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 5120 \text{ kg}$$

**Año 2, celda 1, niveles 1 y 2.**

La altura de residuos en la celda para el final del segundo año es de 8 metros es decir una capa de 4 metros de residuos y material de cobertura sobre la capa anterior.

Peso de agua en los residuos dispuestos el año anterior

$$M_{AR} = 790 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos nuevos dispuestos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Peso medio (W) para determinar la capacidad de campo de los residuos dispuestos en la celda.

$$W = M_{TC} + \frac{M_{rs} + M_{AR}}{2} + M_c = 5120 \text{ kg} + \frac{2560 \text{ kg} + 790 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 8565 \text{ kg}$$

La capacidad de capto será:

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{8565}{4536 + 8565} = 0.24$$

Peso de agua que puede ser retenida por los residuos.

$$A_{rs} = FC * M_{rs} = 0.24 * 2560 \text{ kg} = 614.4 \text{ kg}$$

El lixiviado que se genera durante este nuevo año es:

$$Lixiviado = M_{AR} - A_{RRS} = 790 \text{ kg} - 614.4 \text{ kg} = 175.6 \text{ kg}$$

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{AR} = 614.4 \text{ kg}$$

Peso total en la celda

$$M_{TC} = M_c + M_{AR} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 614.4 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 4944.4 \text{ kg}$$

**Año 3, celda 1, niveles 1, 2 y 3.**

La altura de residuos en la celda para el final del segundo año es de 12 metros es decir una capa de 4 metros de residuos y material de cobertura sobre la capa anterior.

Peso de agua en los residuos dispuestos el año anterior.

$$M_{AR} = 614.4 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos nuevos dispuestos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Peso medio (W) para determinar la capacidad de campo de los residuos dispuestos en la celda.

$$W = M_{TC2} + M_{TC1} + \frac{M_{rs} + M_{AR}}{2} + M_c = 4944.4 \text{ kg} + 5120 \text{ kg} + \frac{2560 \text{ kg} + 790 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 13509.4 \text{ kg}$$

La capacidad de capto será:

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{13509.4}{4536 + 13509.4} = 0.19$$

#### 4. CONCLUSIONES

El presente documento, presenta la información teórica y técnica para realizar el diseño de rellenos sanitarios tipo zanja o trinchera, calcular la cantidad de biogás generado durante la descomposición anaerobia de la materia orgánica presente en los residuos utilizando para la distribución de la producción anual de biogás producido el método de distribución triangular, determinar la cantidad de lixiviado generado partiendo del balance de agua por unidad de área de celda, calcular o diseñar los canales perimetrales para manejo de aguas de escorrentía, realizar cálculos para la correcta instalación de geomembrana y determinación de costos de operación y construcción del relleno sanitario, así como también calcular el valor de la tarifa a cobrar por concepto de disposición final en el relleno sanitario, esta parte se realiza conforme a lo establecido en la resolución 351 de la CRA.

La hoja de cálculo que se presenta anexa al documento es el eje central del trabajo y se realizó para determinar la proyección de población que será atendida por un relleno sanitario hipotético, los cálculos están realizados estrictamente para rellenos sanitarios tipo zanja o trinchera, aprovechando a que la mayoría parte del departamento presenta una topografía plana, lo que conduce a que en la mayoría de los casos el tipo de relleno sanitario a implementar será del tipo zanja o trinchera.

A lo largo de la hoja de cálculo presentada, el usuario podrá ver las ecuaciones utilizadas para la determinación de los diferentes parámetros que se requieren con el fin de realizar las proyecciones de producción de biogás y lixiviado generado y diseño de canales perimetrales, instalación de geomembrana y cálculo de tarifa de disposición final.

La determinación de la producción de biogás y lixiviado es un factor sumamente importante para el diseño, operación y configuración de un relleno sanitario, de estos parámetros dependen ciertas decisiones operativas, como por ejemplo la determinación del sistema de tratamiento de lixiviados y el dimensionamiento o diseño de estos, además con el fin de adelantar trámites de licencia ambiental del relleno sanitario, esta información es fundamental.

La proyección de la cantidad de gas generado se hace completamente necesaria para determinar el número de chimeneas en el relleno sanitario, también para poder evaluar la posibilidad de realizar procesos de desgasificación del relleno sanitario. La proyección de biogás generado permitirá realizar dimensionamiento de los sistemas de limpieza del gas para su aprovechamiento, además de permitir establecer la posible cantidad de energía aprovechable dada la cantidad de metano que se genera.

La proyección de lixiviado generado junto con la meteorología del lugar donde será ubicado el relleno sanitario, es completamente necesaria para determinar el tipo de tratamiento que se requiere para los lixiviados, el dimensionamiento del sistema de tratamiento y según la proyección para evaluar alternativas tendientes a la reducción del lixiviado que se genera, por ejemplo la instalación de geomembrana una vez que la celda llegue a su máxima altura, de esta manera se minimiza la infiltración de agua dentro de la celda y por lo tanto la generación de lixiviados.

Todo aquel que utilice la hoja de cálculo encontrara una herramienta que le permitirá hacer proyecciones de población a 30 años con el fin de dimensionar la celda requerida para la operación año a año del relleno sanitario, basado en la caracterización física de los residuos y su composición química promedio y porcentaje de humedad podrá hacer la proyección de cantidad de biogás generado, finalmente con la información de biogás generado, el dimensionamiento de la celda y las características meteorológicas del lugar podrá efectuar los cálculos de biogás generado en el relleno sanitario.

La hoja de cálculo está planteada de manera que se obtenga la mayor información posible para la proyección de la construcción de un relleno sanitario, proyectado a 30 años, el usuario podrá comprender las diferentes actividades que hacen parte de la proyección, construcción y operación de un relleno sanitario y tendrá una herramienta para establecer la viabilidad económica de la construcción del relleno sanitario, cabe aclarar en este punto que dentro de los costos no se tubo e cuenta el consto de terreno en el cual se construirá el relleno sanitario, aun que esta información resulta fundamental importante para establecer al tasa interna de retorno del proyecto, no se contemplo en este trabajo debido a las diferencias en la hectárea de terreno que se presentan a lo largo del territorio nacional.

Es bien sabido que existen varios métodos para hacer al proyección de producción de biogás en rellenos sanitarios, la metodología presentada en este trabajo no es necesariamente la más precisa, pero proporciona una tendencia que puede ser verificada y corregida durante la operación del relleno sanitario, el esquema de distribución triangular de producción de biogás ha sido empleado durante varios años y ha presentado resultados aceptables en diversos lugares del mundo donde se ha aplicado.

## 5. BIBLIOGRAFIA

BAGCHI, AMALENDU, DESIGN OF LANDFILL AND INTEGRATED SOLID WASTE MANAGEMENT, Editorial John Wiley & Sons. 2004.

CASTELLS, ELIAS XAVIER, TRATAMIENTO Y VALORIZACION ENERGETICA DE RESIDUOS, Editorial Días de santos, 2002.

COLLAZOS, HECTOR; DUQUE, RAMON RESIDUOS SOLIDOS, ACODAL. 1998.

COLLAZOS. HECTOR, DISEÑO Y OPERACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS, ACODAL. 2001.

TCHOBANOGLIOUS, GEORGE; THEISEN HILARY; VIGIL, A. SAMUEL. INTEGRATED SOLID WASTE MANAGEMENT, ENGINEERING PRINCIPLES AND MANAGEMENT ISSUES, McGrawHill International Editions, Civil Engineering Series, 1993.

## 6. ANEXOS

### 6.1 CALCULO DE LA GENERACIÓN DE LIXIVIADOS

Para determinar la velocidad de producción de lixiviados en un relleno sanitario se requiere de la siguiente información:

Periodo de relleno de residuos, se refiere al tiempo de operación del relleno sanitario. En días.

Superficie requerida por día, referido a la superficie de o área sobre la cual se disponen los residuos diariamente, expresada en  $m^2$ ,  $\langle A_r \rangle$

Residuos colocados por día. Expresado en kg/día,  $\langle R_d \rangle$

Residuos colocados por año. En kg/año,  $\langle R_a \rangle$

Peso específico compactado de residuos, se refiere a la densidad esperada de los residuos dispuestos después de compactados en la celda, generalmente se emplea un valor de  $0.85 \text{ ton}/m^3 = 850 \text{ kg}/m^3$ .  $\langle \rho_{rc} \rangle$

Contenido de humedad de residuos, el rango de esta variables está entre 20 % en masa – 50 % peso masa.  $\langle \%H \rangle$

Peso específico del suelo de cobertura, depende del tipo de suelo un valor que se puede tomar entre  $1400 \text{ kg}/m^3$  y  $1800 \text{ kg}/m^3$ ,  $\langle \rho_s \rangle$

Agua consumida en la formación de gas, este dato se determina de la estequiometría de la degradación anaerobia de la materia orgánica presente en los residuos dispuestos. Masa de agua consumida por metro cúbico de residuos dispuesto,  $\langle \text{kg}/m^3 \rangle$

Peso específico del gas, este valor depende de la temperatura de salida del gas que en promedio está entre 40 y 70 °C, el valor de este peso específico oscila entre 1.2 y 1.4  $\text{kg}/m^3$ .  $\langle \rho_g \rangle$

Relación de residuos,  $1:3 \text{ } 0.333/ 1-0.333 = 0.67$ , es decir que por cada metro de altura de residuos en la celda, 67 centímetro estarán ocupados por basura y los otros 33 serán material de cobertura.  $\langle r \rangle$

Precipitación de lluvia que cae sobre el piso relleno, date que se debe establecer por fuentes meteorológicas, se expresa en  $\text{mm}/m^2/\text{año}$ .  $\langle P \rangle$

Altura de la capa al final del primer año. En otros términos es la altura alcanzada de los residuos y el material de cobertura al final del año de operación, expresada en m. (Promedio). <h>

### **Ejemplo de cálculo.**

Los cálculos se inician al final del año 1, para el cual se espera que la altura de residuos en la celda sea de X metros, se toma como base para los cálculos 1 m<sup>2</sup> de celda y 1 kg de residuos dispuestos.

#### **Año 1, Celda 1, Niveles 1.**

La altura de residuos al final del primer año de operación es de 4 metros.

a) *Peso del material de cubierta de los residuos al final del año de operación.*

Material de cubierta.

$$M_c = \rho_s * h * r * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2$$

A manera de ejemplo, tomando una densidad del material de cobertura de 1465 kg/m<sup>3</sup>, para un periodo de operación de 1 año, una relación Residuos/cobertura de 1/3, para 1 m<sup>2</sup> de superficie sobre la celda y una altura de residuos dispuestos de 4 m.

$$M_c = 1770 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{1}{5} * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2 * 5 \text{ m} = 1770 \text{ kg}$$

b) *Peso de residuos.*

$$M_r = \rho_r * h * (1 - r) * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2$$

$$M_r = 800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(1 - \frac{1}{5}\right) * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2 * 5 \text{ m} = 3200 \text{ kg}$$

$$M_t = M_c + M_r = 1700 \text{ kg} + 3200 \text{ kg} = 4900 \text{ kg}$$

c) *Peso de los residuos secos, asumiendo que el % de humedad de los residuos es del 20%.*

$$M_{rs} = M_r * \left(1 - \frac{\%H}{100}\right) = 3200 * \left(1 - \frac{20}{100}\right) = 2560 \text{ kg}$$

d) Contenido de humedad en los residuos (20% masa).

$$M_{hr} = M_r * \frac{\%H}{100} = 3200 * \frac{20}{100} = 640 \text{ kg}$$

Peso del agua de escorrentía que ingresa en la celda, en este ejemplo se supondrá que después de realizado el balance hídrico la cantidad de agua que ingresa en la celda es de 150 mm/m<sup>2</sup>/año.

$$M_{ap} = P * 1 \text{ m}^2 * \rho_{agua} = 150 \frac{\text{mm}}{\text{m}^2 * \text{año}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 1 \text{ m}^2 * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 150 \text{ kg}$$

Masa total dispuesta sobre 1 m<sup>2</sup> de celda, durante un año.

$$M_T = M_c + M_r + M_{ap} = 1700 \text{ kg} + 3200 \text{ kg} + 150 \text{ kg} = 5050 \text{ kg}$$

Antes de calcular el factor de campo se debe hacer el cálculo de la cantidad de agua presente en los residuos, lo cual se hace de la siguiente manera:

$$M_{ar} = M_{hr} + M_{ap} = 640 \text{ kg} + 150 \text{ kg} = 790 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Para calcular el peso medio de residuos dispuestos (W) en la celda se aplica la siguiente ecuación.

$$W = \frac{M_{rs} + M_{ar}}{2} + M_c = \frac{2560 \text{ kg} + 790 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 3445 \text{ kg}$$

Calculo del factor de campo de los residuos. Es la capacidad de retención de humedad de los residuos expresada como fracción. \*CC

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{3445}{4536 + 3445} = 0.3625$$

- e) Conocida la capacidad de campo se determina la masa de agua que puede ser retenida por los residuos secos.

$$A_{rs} = FC * M_{rs} = 0.3625 * 2560 \text{ kg} = 928.23 \text{ kg}$$

- f) Lixiviados producidos, la cantidad de lixiviado generado depende de la cantidad de agua que se infiltre en la celda y la cantidad de agua que puede ser retenida por los residuos. Lixiviado producido por la precipitación que satura la masa de residuos dispuestos.

$$Lix = M_{ar} - A_{rs} = 790 \text{ kg} - 928.23 \text{ kg} = -138.23 \text{ kg}$$

Los resultados negativos indican que no hay generación de lixiviado, al contrario, los residuos dispuestos son capaces de retener una cantidad superior de agua, es decir son capaces de absorber 138.23 kg de agua, Cuando la cantidad de Lixiviado es menor o igual que cero significa que los residuos en la celda pueden retener mayor humedad y por lo tanto no se presenta generación de lixiviado, cuando el valor de Lixiviado es mayor que cero es porque los residuos no son capaces de absorber más agua y por lo tanto se presenta la generación de lixiviado.

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{arc} = M_{ar} - Lix = 790 \text{ kg} - 0 \text{ kg} = 790 \text{ kg}$$

Peso total en la celda

$$M_{TC} = M_c + M_{arc} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 790 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 5120 \text{ kg}$$

**Año 2, Celda 1, Niveles 1 y 2.**

**Nivel 2.**

Dado que esta es la celda que está expuesta a la atmosfera, los cálculos son

exactamente iguales a los del nivel 1 en el año 1.

a) *Peso del material de cubierta de los residuos al final del año de operación.*

Material de cubierta.

$$M_c = \rho_s * h * r * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2$$

A manera de ejemplo, tomando una densidad del material de cobertura de 1465 kg/m<sup>3</sup>, para un periodo de operación de 1 año, una relación Residuos/cobertura de 1/3, para 1 m<sup>2</sup> de superficie sobre la celda y una altura de residuos dispuestos de 4 m.

$$M_c = 1770 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{1}{5} * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2 * 5 \text{ m} = 1770 \text{ kg}$$

b) *Peso de residuos.*

$$M_r = \rho_r * h * (1 - r) * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2$$

$$M_r = 800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(1 - \frac{1}{5}\right) * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2 * 5 \text{ m} = 3200 \text{ kg}$$

$$M_t = M_c + M_r = 1700 \text{ kg} + 3200 \text{ kg} = 4900 \text{ kg}$$

c) *Peso de los residuos secos, asumiendo que el % de humedad de los residuos es del 20%.*

$$M_{rs} = M_r * \left(1 - \frac{\%H}{100}\right) = 3200 * \left(1 - \frac{20}{100}\right) = 2560 \text{ kg}$$

d) *Contenido de humedad en los residuos (20% masa).*

$$M_{hr} = M_r * \frac{\%H}{100} = 3200 * \frac{20}{100} = 640 \text{ kg}$$

Peso del agua de escorrentía que ingresa en la celda, en este ejemplo se supondrá que después de realizado el balance hídrico la cantidad de agua que ingresa en la celda es de 150 mm/m<sup>2</sup>/año.

$$M_{ap} = P * 1 m^2 * \rho_{agua} = 150 \frac{mm}{m^2 * año} * \frac{1 m}{1000 mm} * 1 m^2 * 1000 \frac{kg}{m^3} = 150 kg$$

Masa total dispuesta sobre 1 m<sup>2</sup> de celda, durante un año.

$$M_T = M_c + M_r + M_{ap} = 1700 kg + 3200 kg + 150 kg = 5050 kg$$

Antes de calcular el factor de campo se debe hacer el cálculo de la cantidad de agua presente en los residuos, lo cual se hace de la siguiente manera:

$$M_{ar} = M_{hr} + M_{ap} = 640 kg + 150 kg = 790 kg$$

Peso seco de los residuos en la celda

$$M_{rs} = 2560 kg$$

Para calcular el peso medio de residuos dispuestos (W) en la celda se aplica la siguiente ecuación.

$$W = \frac{M_{rs} + M_{ar}}{2} + M_c = \frac{2560 kg + 790 kg}{2} + 1770 kg = 3445 kg$$

Calculo del factor de campo de los residuos. Es la capacidad de retención de humedad de los residuos expresada como fracción.

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{3445}{4536 + 3445} = 0.3625$$

- e) Conocida la capacidad de campo se determina la masa de agua que puede ser retenida por los residuos secos.

$$A_{rs} = FC * M_{rs} = 0.3625 * 2560 kg = 928.23 kg$$

- f) Lixiviados producidos, la cantidad de lixiviado generado depende de la cantidad de agua que se infiltre en la celda y la cantidad de agua que puede ser retenida por los residuos. Lixiviado producido por la precipitación que satura la masa de residuos dispuestos.

$$Lix_{N2} = M_{ar} - A_{rs} = 790 \text{ kg} - 928.23 \text{ kg} = -138.23 \text{ kg} \rightarrow \text{Valor negativo se toma como 0}$$

Este resultado indica que no hay producción de lixiviado en nivel 2 al final del segundo año de operación del relleno.

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{arc} = M_{ar} - Lix = 790 \text{ kg} - 0 \text{ kg} = 790 \text{ kg}$$

Peso total en la celda, Nivel 2.

$$M_{TC_{N2}} = M_c + M_{AR} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 790 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 5120 \text{ kg}$$

### **Nivel 1.**

La altura de residuos en la celda para el final del segundo año es de 8 metros es decir una capa de 4 metros de residuos y material de cobertura sobre la capa anterior.

Peso de agua en los residuos dispuestos el año anterior.

$$M_{ar} = M_{ar} + Lix_{N2} = 790 \text{ kg} + 0 \text{ kg} = 790 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos nuevos dispuestos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Peso medio (W) para determinar la capacidad de campo de los residuos dispuestos en la celda.

$$W = M_{TC_{N_2}} + \frac{M_{rs} + M_{ar}}{2} + M_c = 5120 \text{ kg} + \frac{2560 \text{ kg} + 790 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 8565 \text{ kg}$$

La capacidad de campo será:

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{8565}{4536 + 8565} = 0.24$$

Peso de agua que puede ser retenida por los residuos.

$$A_{rs} = FC * M_{rs} = 0.24 * 2560 \text{ kg} = 614.4 \text{ kg}$$

El lixiviado que se genera durante este nuevo año es:

$$Lix_{N_1} = M_{ar} - A_{rs} = 790 \text{ kg} - 614.4 \text{ kg} = 175.6 \text{ kg}$$

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{arc} = M_{ar} - Lix_{N_1} = 790 \text{ kg} - 175.6 \text{ kg} = 614.4 \text{ kg}$$

Peso total en la celda

$$M_{TC_1} = M_c + M_{arc} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 614.4 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 4944.4 \text{ kg}$$

### **Año 3, Celda 1, Niveles 1, 2 y 3.**

#### **Nivel 3**

Dado que esta es la celda que está expuesta a la atmosfera, los cálculos son exactamente iguales a los del nivel 1 en el año 1.

a) *Peso del material de cubierta de los residuos al final del año de operación.*

Material de cubierta.

$$M_c = \rho_s * h * r * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2$$

Siguiendo con el ejemplo, de igual modo que en el caso de la celda 1 en el año1.

$$M_c = 1770 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{1}{5} * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2 * 5 \text{ m} = 1770 \text{ kg}$$

b) Peso de residuos.

$$M_r = \rho_r * h * (1 - r) * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2$$

$$M_r = 800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(1 - \frac{1}{5}\right) * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2 * 5 \text{ m} = 3200 \text{ kg}$$

$$M_t = M_c + M_r = 1700 \text{ kg} + 3200 \text{ kg} = 4900 \text{ kg}$$

c) Peso de los residuos secos, asumiendo que el % de humedad de los residuos es del 20%.

$$M_{rs} = M_r * \left(1 - \frac{\%H}{100}\right) = 3200 * \left(1 - \frac{20}{100}\right) = 2560 \text{ kg}$$

d) Contenido de humedad en los residuos (20% masa).

$$M_{hr} = M_r * \frac{\%H}{100} = 3200 * \frac{20}{100} = 640 \text{ kg}$$

Peso del agua de escorrentía que ingresa en la celda, en este ejemplo se supondrá que después de realizado el balance hídrico la cantidad de agua que ingresa en la celda es de 150 mm/m<sup>2</sup>/año.

$$M_{ap} = P * 1 \text{ m}^2 * \rho_{\text{agua}} = 150 \frac{\text{mm}}{\text{m}^2 * \text{año}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 1 \text{ m}^2 * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 150 \text{ kg}$$

Masa total dispuesta sobre 1 m<sup>2</sup> de celda, durante un año.

$$M_T = M_c + M_r + M_{ap} = 1700 \text{ kg} + 3200 \text{ kg} + 150 \text{ kg} = 5050 \text{ kg}$$

Antes de calcular el factor de campo se debe hacer el cálculo de la cantidad de agua presente en los residuos, lo cual se hace de la siguiente manera:

$$M_{ar} = M_{hr} + M_{ap} = 640 \text{ kg} + 150 \text{ kg} = 790 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Para calcular el peso medio de residuos dispuestos (W) en la celda se aplica la siguiente ecuación.

$$W = \frac{M_{rs} + M_{ar}}{2} + M_c = \frac{2560 \text{ kg} + 790 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 3445 \text{ kg}$$

Calculo del factor de campo de los residuos. Es la capacidad de retención de humedad de los residuos expresada como fracción.

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{3445}{4536 + 3445} = 0.3625$$

- e) Conocida la capacidad de campo se determina la masa de agua que puede ser retenida por los residuos secos.

$$A_{rs} = FC * M_{rs} = 0.3625 * 2560 \text{ kg} = 928.23 \text{ kg}$$

- f) Lixiviados producidos, la cantidad de lixiviado generado depende de la cantidad de agua que se infiltre en la celda y la cantidad de agua que puede

ser retenida por los residuos. Lixiviado producido por la precipitación que satura la masa de residuos dispuestos.

$$Lix_{N3} = M_{ar} - A_{rs} = 790 \text{ kg} - 928.23 \text{ kg} = -138.23 \text{ kg} \rightarrow \text{Valor negativo se toma como 0}$$

Este resultado indica que no hay producción de lixiviado en el nivel 3 al final del tercer año de operación del relleno.

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{arc} = M_{ar} - Lix = 790 \text{ kg} - 0 \text{ kg} = 790 \text{ kg}$$

Peso total en la celda, Nivel 2.

$$M_{TC_{N3}} = M_c + M_{arc} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 790 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 5120 \text{ kg}$$

### **Nivel 2.**

La altura de residuos en la celda para el final del tercer año es de 8 metros es decir una capa de 4 metros de residuos y material de cobertura sobre el nivel 2.

Peso de agua en los residuos dispuestos el año anterior.

$$M_{ar} = M_{ar} + Lix_{N3} = 790 \text{ kg} + 0 \text{ kg} = 790 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos nuevos dispuestos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Peso medio (W) para determinar la capacidad de campo de los residuos dispuestos en la celda.

$$W = M_{TC_{N3}} + \frac{M_{rs} + M_{ar}}{2} + M_c = 5120 \text{ kg} + \frac{2560 \text{ kg} + 790 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 8565 \text{ kg}$$

La capacidad de campo será:

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{8565}{4536 + 8565} = 0.24$$

Peso de agua que puede ser retenida por los residuos.

$$A_{rs} = FC * M_{rs} = 0.24 * 2560 \text{ kg} = 614.4 \text{ kg}$$

El lixiviado que se genera durante este nuevo año es:

$$Lix_{N2} = M_{ar} - A_{rs} = 790 \text{ kg} - 614.4 \text{ kg} = 175.6 \text{ kg}$$

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{arc} = M_{ar} - Lix_{N2} = 790 \text{ kg} - 175.6 \text{ kg} = 614.4 \text{ kg}$$

Peso total en la celda

$$M_{TC_2} = M_c + M_{arc} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 614.4 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 4944.4 \text{ kg}$$

### **Nivel 1.**

La altura de residuos en la celda para el final del tercer año es de 12 metros es decir una capa de 8 metros de residuos y material de cobertura sobre la capa anterior.

Peso de agua en los residuos dispuestos el año anterior.

$$M_{ar} = M_{arc} + Lix_{N2} = 614.4 \text{ kg} + 175.6 \text{ kg} = 790 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos nuevos dispuestos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Peso medio (W) para determinar la capacidad de campo de los residuos dispuestos en la celda.

$$W = M_{TC3} + M_{TC2} + \frac{M_{rs} + M_{AR}}{2} + M_c = 4944.4 \text{ kg} + 5120 \text{ kg} + \frac{2560 \text{ kg} + 790 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 13509.4 \text{ kg}$$

La capacidad de campo será:

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{13509.4}{4536 + 13509.4} = 0.19$$

Peso de agua que puede ser retenida por los residuos.

$$A_{rs} = FC * M_{rs} = 0.19 * 2560 \text{ kg} = 486.4 \text{ kg}$$

El lixiviado que se genera durante este nuevo año es:

$$Lix_{N1} = M_{ar} - A_{rs} = 790 \text{ kg} - 486.4 \text{ kg} = 303.6 \text{ kg}$$

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{arc} = M_{ar} - Lix_{N1} = 790 \text{ kg} - 303.6 \text{ kg} = 486.4 \text{ kg}$$

Peso total en la celda

$$M_{TC1} = M_c + M_{arc} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 486.4 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 4816.4 \text{ kg}$$

**Año 4, Celda 1, Niveles 1, 2, 3 y 4.**

**Nivel 4.**

Dado que esta es la celda que está expuesta a la atmosfera, los cálculos son exactamente iguales a los del nivel 1 en el año 1.

a) *Peso del material de cubierta de los residuos al final del año de operación.*

Material de cubierta.

$$M_c = \rho_s * h * r * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2$$

Siguiendo con el ejemplo, de igual modo que en el caso de la celda 1 en el año1.

$$M_c = 1770 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{1}{5} * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2 * 5 \text{ m} = 1770 \text{ kg}$$

b) Peso de residuos.

$$M_r = \rho_r * h * (1 - r) * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2$$

$$M_r = 800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(1 - \frac{1}{5}\right) * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2 * 5 \text{ m} = 3200 \text{ kg}$$

$$M_t = M_c + M_r = 1700 \text{ kg} + 3200 \text{ kg} = 4900 \text{ kg}$$

c) Peso de los residuos secos, asumiendo que el % de humedad de los residuos es del 20%.

$$M_{rs} = M_r * \left(1 - \frac{\%H}{100}\right) = 3200 * \left(1 - \frac{20}{100}\right) = 2560 \text{ kg}$$

d) Contenido de humedad en los residuos (20% masa).

$$M_{hr} = M_r * \frac{\%H}{100} = 3200 * \frac{20}{100} = 640 \text{ kg}$$

Peso del agua de escorrentía que ingresa en la celda, en este ejemplo se supondrá que después de realizado el balance hídrico la cantidad de agua que ingresa en la celda es de 150 mm/m<sup>2</sup>/año.

$$M_{ap} = P * 1 \text{ m}^2 * \rho_{\text{agua}} = 150 \frac{\text{mm}}{\text{m}^2 * \text{año}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 1 \text{ m}^2 * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 150 \text{ kg}$$

Masa total dispuesta sobre 1 m<sup>2</sup> de celda, durante un año.

$$M_T = M_c + M_r + M_{ap} = 1700 \text{ kg} + 3200 \text{ kg} + 150 \text{ kg} = 5050 \text{ kg}$$

Antes de calcular el factor de campo se debe hacer el cálculo de la cantidad de agua presente en los residuos, lo cual se hace de la siguiente manera:

$$M_{ar} = M_{hr} + M_{ap} = 640 \text{ kg} + 150 \text{ kg} = 790 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Para calcular el peso medio de residuos dispuestos ( $W$ ) en la celda se aplica la siguiente ecuación.

$$W = \frac{M_{rs} + M_{ar}}{2} + M_c = \frac{2560 \text{ kg} + 790 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 3445 \text{ kg}$$

Calculo del factor de campo de los residuos. Es la capacidad de retención de humedad de los residuos expresada como fracción.

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{3445}{4536 + 3445} = 0.3625$$

e) Conocida la capacidad de campo se determina la masa de agua que puede ser retenida por los residuos secos.

$$A_{rs} = FC * M_{rs} = 0.3625 * 2560 \text{ kg} = 928.23 \text{ kg}$$

f) Lixiviados producidos, la cantidad de lixiviado generado depende de la cantidad de agua que se infiltre en la celda y la cantidad de agua que puede ser retenida por los residuos. Lixiviado producido por la precipitación que satura la masa de residuos dispuestos.

$$Lix_{N3} = M_{ar} - A_{rs} = 790 \text{ kg} - 928.23 \text{ kg} = -138.23 \text{ kg} \rightarrow \text{Valor negativo se toma como } 0$$

Este resultado indica que no hay producción de lixiviado en el nivel 4 al final del cuarto año de operación del relleno.

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{arc} = M_{ar} - Lix = 790 \text{ kg} - 0 \text{ kg} = 790 \text{ kg}$$

Peso total en la celda, Nivel 4.

$$M_{TC_{N4}} = M_c + M_{arc} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 790 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 5120 \text{ kg}$$

### **Nivel 3.**

La altura de residuos en este nivel para el final del cuarto año es de 8 metros es decir una capa de 4 metros de residuos y material de cobertura sobre el nivel 3. Peso de agua en los residuos dispuestos el año anterior.

$$M_{ar} = M_{ar} + Lix_{N3} = 790 \text{ kg} + 0 \text{ kg} = 790 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos nuevos dispuestos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Peso medio (W) para determinar la capacidad de campo de los residuos dispuestos en la celda.

$$W = M_{TC_{N4}} + \frac{M_{rs} + M_{ar}}{2} + M_c = 5120 \text{ kg} + \frac{2560 \text{ kg} + 790 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 8565 \text{ kg}$$

La capacidad de campo será:

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{8565}{4536 + 8565} = 0.24$$

Peso de agua que puede ser retenida por los residuos.

$$A_{rs} = FC * M_{rs} = 0.24 * 2560 \text{ kg} = 614.4 \text{ kg}$$

El lixiviado que se genera durante este nuevo año es:

$$Lix_{N3} = M_{ar} - A_{rs} = 790 \text{ kg} - 614.4 \text{ kg} = 175.6 \text{ kg}$$

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{arc} = M_{ar} - Lix_{N3} = 790 \text{ kg} - 175.6 \text{ kg} = 614.4 \text{ kg}$$

Peso total en la celda

$$M_{TC3} = M_c + M_{arc} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 614.4 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 4944.4 \text{ kg}$$

## **Nivel 2**

La altura de residuos en la celda para el final del cuarto año es de 12 metros es decir una capa de 8 metros de residuos y material de cobertura sobre la capa anterior.

Peso de agua en los residuos dispuestos el año anterior.

$$M_{ar} = M_{arc} + Lix_{N3} = 614.4 \text{ kg} + 175.6 \text{ kg} = 790 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos nuevos dispuestos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Peso medio (W) para determinar la capacidad de campo de los residuos dispuestos en la celda.

$$W = M_{TC4} + M_{TC3} + \frac{M_{rs} + M_{AR}}{2} + M_c = 5120 \text{ kg} + 4944.4 \text{ kg} + \frac{2560 \text{ kg} + 790 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 13509.4 \text{ kg}$$

La capacidad de campo será:

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{13509.4}{4536 + 13509.4} = 0.19$$

Peso de agua que puede ser retenida por los residuos.

$$A_{rs} = FC * M_{rs} = 0.19 * 2560 \text{ kg} = 486.4 \text{ kg}$$

El lixiviado que se genera durante este nuevo año es:

$$Lix_{N2} = M_{ar} - A_{rs} = 790 \text{ kg} - 486.4 \text{ kg} = 303.6 \text{ kg}$$

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{arc} = M_{ar} - Lix_{N1} = 790 \text{ kg} - 303.6 \text{ kg} = 486.4 \text{ kg}$$

Peso total en la celda

$$M_{TC2} = M_c + M_{arc} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 486.4 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 4816.4 \text{ kg}$$

### **Nivel 1.**

Peso de agua en los residuos dispuestos el año anterior.

$$M_{ar} = M_{arc} + Lix_{N2} = 486.4 \text{ kg} + 303.6 \text{ kg} = 790 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos nuevos dispuestos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Peso medio (W) para determinar la capacidad de campo de los residuos dispuestos en la celda.

$$W = M_{TC4} + M_{TC3} + M_{TC2} + \frac{M_{rs} + M_{AR}}{2} + M_c = 5120 \text{ kg} + 4944.4 \text{ kg} + 4816.4 \text{ kg} + \frac{2560 \text{ kg} + 790 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 18325.8 \text{ kg}$$

La capacidad de campo será:

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{18325.8}{4536 + 18325.8} = 0.16$$

Peso de agua que puede ser retenida por los residuos.

$$A_{rs} = FC * M_{rs} = 0.16 * 2560 \text{ kg} = 409.6 \text{ kg}$$

El lixiviado que se genera durante este nuevo año es:

$$Lix_{N1} = M_{ar} - A_{rs} = 790 \text{ kg} - 409.6 \text{ kg} = 380.4 \text{ kg}$$

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{arc} = M_{ar} - Lix_{N1} = 790 \text{ kg} - 380.4 \text{ kg} = 409.6 \text{ kg}$$

Peso total en la celda

$$M_{TC1} = M_c + M_{arc} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 409.6 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 4739.6 \text{ kg}$$

**Año 5, Celda 1, Niveles 1, 2, 3, 4 y 5.**

**Nivel 5.**

Dado que esta es la celda que está expuesta a la atmosfera, los cálculos son exactamente iguales a los del nivel 1 en el año 1.

a) *Peso del material de cubierta de los residuos al final del año de operación.*

Material de cubierta.

$$M_c = \rho_s * h * r * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2$$

Siguiendo con el ejemplo, de igual modo que en el caso de la celda 1 en el año1.

$$M_c = 1770 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{1}{5} * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2 * 5 \text{ m} = 1770 \text{ kg}$$

b) Peso de residuos.

$$M_r = \rho_r * h * (1 - r) * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2$$

$$M_r = 800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(1 - \frac{1}{5}\right) * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2 * 5 \text{ m} = 3200 \text{ kg}$$

$$M_t = M_c + M_r = 1700 \text{ kg} + 3200 \text{ kg} = 4900 \text{ kg}$$

c) Peso de los residuos secos, asumiendo que el % de humedad de los residuos es del 20%.

$$M_{rs} = M_r * \left(1 - \frac{\%H}{100}\right) = 3200 * \left(1 - \frac{20}{100}\right) = 2560 \text{ kg}$$

d) Contenido de humedad en los residuos (20% masa).

$$M_{hr} = M_r * \frac{\%H}{100} = 3200 * \frac{20}{100} = 640 \text{ kg}$$

Peso del agua de escorrentía que ingresa en la celda, en este ejemplo se supondrá que después de realizado el balance hídrico la cantidad de agua que ingresa en la celda es de 150 mm/m<sup>2</sup>/año.

$$M_{ap} = P * 1 \text{ m}^2 * \rho_{\text{agua}} = 150 \frac{\text{mm}}{\text{m}^2 * \text{año}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 1 \text{ m}^2 * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 150 \text{ kg}$$

Masa total dispuesta sobre 1 m<sup>2</sup> de celda, durante un año.

$$M_T = M_c + M_r + M_{ap} = 1700 \text{ kg} + 3200 \text{ kg} + 150 \text{ kg} = 5050 \text{ kg}$$

Antes de calcular el factor de campo se debe hacer el cálculo de la cantidad de agua presente en los residuos, lo cual se hace de la siguiente manera:

$$M_{ar} = M_{hr} + M_{ap} = 640 \text{ kg} + 150 \text{ kg} = 790 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Para calcular el peso medio de residuos dispuestos (W) en la celda se aplica la siguiente ecuación.

$$W = \frac{M_{rs} + M_{ar}}{2} + M_c = \frac{2560 \text{ kg} + 790 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 3445 \text{ kg}$$

Cálculo del factor de campo de los residuos. Es la capacidad de retención de humedad de los residuos expresada como fracción.

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{3445}{4536 + 3445} = 0.3625$$

e) Conocida la capacidad de campo se determina la masa de agua que puede ser retenida por los residuos secos.

$$A_{ms} = FC * M_{rs} = 0.3625 * 2560 \text{ kg} = 928.23 \text{ kg}$$

f) Lixiviados producidos, la cantidad de lixiviado generado depende de la cantidad de agua que se infiltre en la celda y la cantidad de agua que puede ser retenida por los residuos. Lixiviado producido por la precipitación que satura la masa de residuos dispuestos.

$$Lix_{N3} = M_{ar} - A_{ms} = 790 \text{ kg} - 928.23 \text{ kg} = -138.23 \text{ kg} \rightarrow \text{Valor negativo se toma como 0}$$

Este resultado indica que no hay producción de lixiviado en el nivel 5 al final del quinto año de operación del relleno.

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{arc} = M_{ar} - Lix = 790 \text{ kg} - 0 \text{ kg} = 790 \text{ kg}$$

Peso total en la celda, Nivel 5.

$$M_{TC_{N5}} = M_c + M_{arc} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 790 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 5120 \text{ kg}$$

#### **Nivel 4.**

La altura de residuos en este nivel para el final del quinto año es de 8 metros, es decir, una capa de 4 metros de residuos y material de cobertura sobre la capa anterior.

Peso de agua en los residuos dispuestos el año anterior.

$$M_{ar} = M_{ar} + Lix_{N5} = 790 \text{ kg} + 0 \text{ kg} = 790 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos nuevos dispuestos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Peso medio (W) para determinar la capacidad de campo de los residuos dispuestos en la celda.

$$W = M_{TC_{N5}} + \frac{M_{rs} + M_{ar}}{2} + M_c = 5120 \text{ kg} + \frac{2560 \text{ kg} + 790 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 8565 \text{ kg}$$

La capacidad de campo será:

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{8565}{4536 + 8565} = 0.24$$

Peso de agua que puede ser retenida por los residuos.

$$A_{rs} = FC * M_{rs} = 0.24 * 2560 \text{ kg} = 614.4 \text{ kg}$$

El lixiviado que se genera durante este nuevo año es:

$$Lix_{N4} = M_{ar} - A_{rs} = 790 \text{ kg} - 614.4 \text{ kg} = 175.6 \text{ kg}$$

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{arc} = M_{ar} - Lix_{N4} = 790 \text{ kg} - 175.6 \text{ kg} = 614.4 \text{ kg}$$

Peso total en la celda

$$M_{TC4} = M_c + M_{arc} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 614.4 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 4944.4 \text{ kg}$$

### **Nivel 3.**

La altura de residuos en la celda para el final del tercer año es de 12 metros es decir una capa de 8 metros de residuos y material de cobertura sobre la capa anterior.

Peso de agua en los residuos dispuestos el año anterior.

$$M_{ar} = M_{arc} + Lix_{N4} = 614.4 \text{ kg} + 175.6 \text{ kg} = 790 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos nuevos dispuestos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Peso medio (W) para determinar la capacidad de campo de los residuos dispuestos en la celda.

$$W = M_{TC5} + M_{TC4} + \frac{M_{rs} + M_{ar}}{2} + M_c = 5120 \text{ kg} + 4944.4 \text{ kg} + \frac{2560 \text{ kg} + 790 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 13509.4 \text{ kg}$$

La capacidad de campo será:

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{13509.4}{4536 + 13509.4} = 0.19$$

Peso de agua que puede ser retenida por los residuos.

$$A_{rs} = FC * M_{rs} = 0.19 * 2560 \text{ kg} = 486.4 \text{ kg}$$

El lixiviado que se genera durante este nuevo año es:

$$Lix_{N3} = M_{ar} - A_{rs} = 790 \text{ kg} - 486.4 \text{ kg} = 303.6 \text{ kg}$$

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{arc} = M_{ar} - Lix_{N3} = 790 \text{ kg} - 303.6 \text{ kg} = 486.4 \text{ kg}$$

Peso total en la celda

$$M_{TC3} = M_c + M_{arc} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 486.4 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 4816.4 \text{ kg}$$

## **Nivel 2.**

Peso de agua en los residuos dispuestos el año anterior.

$$M_{ar} = M_{arc} + Lix_{N3} = 486.4 \text{ kg} + 303.6 \text{ kg} = 790 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos nuevos dispuestos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Peso medio (W) para determinar la capacidad de campo de los residuos dispuestos en la celda.

$$W = M_{TC5} + M_{TC4} + M_{TC3} + \frac{M_{rs} + M_{AR}}{2} + M_c = 5120 \text{ kg} + 4944.4 \text{ kg} + 4816.4 \text{ kg} + \frac{2560 \text{ kg} + 790 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 18325.8 \text{ kg}$$

La capacidad de campo será:

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{18325.8}{4536 + 18325.8} = 0.16$$

Peso de agua que puede ser retenida por los residuos.

$$A_{rs} = FC * M_{rs} = 0.16 * 2560 \text{ kg} = 409.6 \text{ kg}$$

El lixiviado que se genera durante este nuevo año es:

$$Lix_{N2} = M_{ar} - A_{rs} = 790 \text{ kg} - 409.6 \text{ kg} = 380.4 \text{ kg}$$

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{arc} = M_{ar} - Lix_{N2} = 790 \text{ kg} - 380.4 \text{ kg} = 409.6 \text{ kg}$$

Peso total en la celda

$$M_{TC2} = M_c + M_{arc} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 409.6 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 4739.6 \text{ kg}$$

### **Nivel 1.**

Peso de agua en los residuos dispuestos el año anterior.

$$M_{ar} = M_{arc} + Lix_{N2} = 409.6 \text{ kg} + 380.4 \text{ kg} = 790 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos nuevos dispuestos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Peso medio (W) para determinar la capacidad de campo de los residuos dispuestos en la celda.

$$W = M_{TC3} + M_{TC4} + M_{TC3} + M_{TC2} + \frac{M_{rs} + M_{AR}}{2} + M_c = 5120 \text{ kg} + 4944.4 \text{ kg} + 4813.84 \text{ kg} + 4739.6 \text{ kg} + \frac{2560 \text{ kg} + 790 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 23062.84 \text{ kg}$$

La capacidad de campo será:

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{23062.84}{4536 + 23062.84} = 0.141$$

Peso de agua que puede ser retenida por los residuos.

$$A_{rs} = FC * M_{rs} = 0.141 * 2560 \text{ kg} = 360.96 \text{ kg}$$

El lixiviado que se genera durante este nuevo año es:

$$Lix_{N1} = M_{ar} - A_{rs} = 790 \text{ kg} - 360.96 \text{ kg} = 429.04 \text{ kg}$$

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{arc} = M_{ar} - Lix_{N1} = 790 \text{ kg} - 429.04 \text{ kg} = 360.96 \text{ kg}$$

Peso total en la celda

$$M_{TC_3} = M_c + M_{AR} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 360.96 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 4690.96 \text{ kg}$$

### **Año 6, Nivel 1, celdas 1, 2, 3, 4 y 5.**

Los cálculos de para los diferentes niveles de la celda, a partir del año 6, son exactamente los mismo, varia solamente la cantidad de agua que se infiltra por el nivel 5 de la celda, es decir por el nivel superficial.

Para este ejemplo se asume que la precipitación se reduce en un 90% al quedar clausurada la celda. Por lo tanto la cantidad de agua que se infiltra en la celda es: 15 mm/m<sup>2</sup>/año.

$$M_{ap} = P * 1 \text{ m}^2 * \rho_{agua} = 15 \frac{\text{mm}}{\text{m}^2 * \text{año}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 1 \text{ m}^2 * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 15 \text{ kg}$$

Teniendo en cuenta lo anterior los cálculos son los siguientes:

Dado que esta es la celda que está expuesta a la atmosfera, los cálculos son exactamente iguales a los del nivel 1 en el año 1.

a) *Peso del material de cubierta de los residuos al final del año de operación.*

Material de cubierta.

$$M_c = \rho_s * h * r * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2$$

Siguiendo con el ejemplo, de igual modo que en el caso de la celda 1 en el año1.

$$M_c = 1770 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{1}{5} * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2 * 5 \text{ m} = 1770 \text{ kg}$$

b) Peso de residuos.

$$M_r = \rho_r * h * (1-r) * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2$$

$$M_r = 800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(1 - \frac{1}{5}\right) * 1 \text{ año} * 1 \text{ m}^2 * 5 \text{ m} = 3200 \text{ kg}$$

$$M_t = M_c + M_r = 1700 \text{ kg} + 3200 \text{ kg} = 4900 \text{ kg}$$

c) Peso de los residuos secos, asumiendo que el % de humedad de los residuos es del 20%.

$$M_{rs} = M_r * \left(1 - \frac{\%H}{100}\right) = 3200 * \left(1 - \frac{20}{100}\right) = 2560 \text{ kg}$$

d) Contenido de humedad en los residuos (20% masa).

$$M_{hr} = M_r * \frac{\%H}{100} = 3200 * \frac{20}{100} = 640 \text{ kg}$$

Peso del agua de escorrentía como ya se explico se asume que solamente se infiltra el 10% de lo asumido al inicio del ejemplo.

$$M_{ap} = P * 1 \text{ m}^2 * \rho_{\text{agua}} = 15 \frac{\text{mm}}{\text{m}^2 * \text{año}} * \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} * 1 \text{ m}^2 * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 15 \text{ kg}$$

Masa total dispuesta sobre 1 m<sup>2</sup> de celda, durante un año.

$$M_T = M_c + M_r + M_{ap} = 1700 \text{ kg} + 3200 \text{ kg} + 15 \text{ kg} = 4915 \text{ kg}$$

Antes de calcular el factor de campo se debe hacer el cálculo de la cantidad de agua presente en los residuos, lo cual se hace de la siguiente manera:

$$M_{ar} = M_{arc} + M_{ap} = 790 \text{ kg} + 15 \text{ kg} = 805 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Para calcular el peso medio de residuos dispuestos (W) en la celda se aplica la siguiente ecuación.

$$W = \frac{M_{rs} + M_{ar}}{2} + M_c = \frac{2560 \text{ kg} + 805 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 3452.5 \text{ kg}$$

Calculo del factor de campo de los residuos. Es la capacidad de retención de humedad de los residuos expresada como fracción.

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{3452.5}{4536 + 3452.5} = 0.363$$

- e) Conocida la capacidad de campo se determina la masa de agua que puede ser retenida por los residuos secos.

$$A_{rs} = FC * M_{rs} = 0.363 * 2560 \text{ kg} = 929.28 \text{ kg}$$

- f) Lixiviados producidos, la cantidad de lixiviado generado depende de la cantidad de agua que se infiltre en la celda y la cantidad de agua que puede ser retenida por los residuos. Lixiviado producido por la precipitación que satura la masa de residuos dispuestos.

$$Lix_{N3} = M_{ar} - A_{rs} = 805 \text{ kg} - 929.28 \text{ kg} = -124.28 \text{ kg} \rightarrow \text{Valor negativo se toma como 0}$$

Este resultado indica que no hay producción de lixiviado en el nivel 5 al final del quinto año de operación del relleno.

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{arc} = M_{ar} - Lix = 805 \text{ kg} - 0 \text{ kg} = 805 \text{ kg}$$

Peso total en la celda, Nivel 5.

$$M_{TC_{N5}} = M_c + M_{arc} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 705 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 5135 \text{ kg}$$

#### **Nivel 4.**

La altura de residuos en este nivel para el final del quinto año es de 8 metros, es decir, una capa de 4 metros de residuos y material de cobertura sobre la capa anterior.

Peso de agua en los residuos dispuestos el año anterior.

$$M_{ar} = M_{ar} + Lix_{N5} = 614.4 \text{ kg} + 0 \text{ kg} = 614.4 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos nuevos dispuestos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Peso medio (W) para determinar la capacidad de campo de los residuos dispuestos en la celda.

$$W = M_{TC_{N5}} + \frac{M_{rs} + M_{ar}}{2} + M_c = 5135 \text{ kg} + \frac{2560 \text{ kg} + 614.4 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 8492.2 \text{ kg}$$

La capacidad de campo será:

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{8492.2}{4536 + 8492.2} = 0.242$$

Peso de agua que puede ser retenida por los residuos.

$$A_{rs} = FC * M_{rs} = 0.242 * 2560 \text{ kg} = 619.52 \text{ kg}$$

El lixiviado que se genera durante este nuevo año es:

$$Lix_{N4} = M_{ar} - A_{rs} = 790 \text{ kg} - 619.52 \text{ kg} = 170.48 \text{ kg}$$

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{arc} = M_{ar} - Lix_{N4} = 790 \text{ kg} - 170.48 \text{ kg} = 619.52 \text{ kg}$$

Peso total en la celda

$$M_{TC4} = M_c + M_{arc} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 619.52 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 4949.52 \text{ kg}$$

### **Nivel 3.**

La altura de residuos en la celda para el final del tercer año es de 12 metros es decir una capa de 8 metros de residuos y material de cobertura sobre la capa anterior.

Peso de agua en los residuos dispuestos el año anterior.

$$M_{ar} = M_{arc} + Lix_{N4} = 486.4 \text{ kg} + 170.48 \text{ kg} = 656.88 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos nuevos dispuestos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Peso medio (W) para determinar la capacidad de campo de los residuos dispuestos en la celda.

$$W = M_{TC5} + M_{TC4} + \frac{M_{rs} + M_{ar}}{2} + M_c = 5135 \text{ kg} + 4949.52 \text{ kg} + \frac{2560 \text{ kg} + 656.88 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 13462.96 \text{ kg}$$

La capacidad de campo será:

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{13462.96}{4536 + 13462.96} = 0.189$$

Peso de agua que puede ser retenida por los residuos.

$$A_{rs} = FC * M_{rs} = 0.189 * 2560 \text{ kg} = 483.84 \text{ kg}$$

El lixiviado que se genera durante este nuevo año es:

$$Lix_{N3} = M_{ar} - A_{rs} = 656.88 \text{ kg} - 483.84 \text{ kg} = 173.04 \text{ kg}$$

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{arc} = M_{ar} - Lix_{N3} = 656.88 \text{ kg} - 173.04 \text{ kg} = 483.84 \text{ kg}$$

Peso total en la celda

$$M_{TC3} = M_c + M_{arc} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 483.84 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 4813.84 \text{ kg}$$

## **Nivel 2.**

Peso de agua en los residuos dispuestos el año anterior.

$$M_{ar} = M_{arc} + Lix_{N3} = 409.6 \text{ kg} + 173.04 \text{ kg} = 582.64 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos nuevos dispuestos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Peso medio (W) para determinar la capacidad de campo de los residuos dispuestos en la celda.

$$W = M_{TC5} + M_{TC4} + M_{TC3} + \frac{M_{rs} + M_{ar}}{2} + M_c = 5135 \text{ kg} + 4949.52 \text{ kg} + 4813.84 \text{ kg} + \frac{2560 \text{ kg} + 582.64 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 18239.68 \text{ kg}$$

La capacidad de campo será:

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{18239.68}{4536 + 18239.68} = 0.16$$

Peso de agua que puede ser retenida por los residuos.

$$A_{rs} = FC * M_{rs} = 0.16 * 2560 \text{ kg} = 409.6 \text{ kg}$$

El lixiviado que se genera durante este nuevo año es:

$$Lix_{N2} = M_{ar} - A_{rs} = 582.64 \text{ kg} - 409.6 \text{ kg} = 173.04 \text{ kg}$$

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{arc} = M_{ar} - Lix_{N2} = 582.64 \text{ kg} - 173.04 \text{ kg} = 409.6 \text{ kg}$$

Peso total en la celda

$$M_{TC_2} = M_c + M_{arc} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 409.6 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 4739.6 \text{ kg}$$

### **Nivel 1.**

Peso de agua en los residuos dispuestos el año anterior.

$$M_{ar} = M_{arc} + Lix_{N2} = 360.96 \text{ kg} + 173.04 \text{ kg} = 534 \text{ kg}$$

Peso seco de los residuos nuevos dispuestos en la celda

$$M_{rs} = 2560 \text{ kg}$$

Peso medio (W) para determinar la capacidad de campo de los residuos dispuestos en la celda.

$$W = M_{TC_3} + M_{TC_4} + M_{TC_3} + M_{TC_2} + \frac{M_{rs} + M_{ar}}{2} + M_c = 5135 \text{ kg} + 4949.52 \text{ kg} + 4813.84 \text{ kg} + 4739.6 \text{ kg} + \frac{2560 \text{ kg} + 534 \text{ kg}}{2} + 1770 \text{ kg} = 22954.96 \text{ kg}$$

La capacidad de campo será:

$$FC = 0.6 - 0.55 * \frac{W}{4536 + W} = 0.6 - 0.55 * \frac{22954.96}{4536 + 22954.96} = 0.141$$

Peso de agua que puede ser retenida por los residuos.

$$A_{rs} = FC * M_{rs} = 0.141 * 2560 \text{ kg} = 360.96 \text{ kg}$$

El lixiviado que se genera durante este nuevo año es:

$$Lix_{N1} = M_{ar} - A_{rs} = 534 \text{ kg} - 360.96 \text{ kg} = 173.04 \text{ kg}$$

Peso de agua remanente en la celda.

$$M_{arc} = M_{ar} - Lix_{N1} = 534 \text{ kg} - 173.04 \text{ kg} = 360.96 \text{ kg}$$

Peso total en la celda

$$M_{TC_3} = M_c + M_{arc} + M_{rs} = 1770 \text{ kg} + 360.96 \text{ kg} + 2560 \text{ kg} = 4690.96 \text{ kg}$$

Para los demás años los cálculos se realizan de manera análoga, los cálculos se realizan hasta que el valor de  $Lix_{N1}$  se hace constante

## **6.2 MANUAL DE OPERACIÓN DE LA HOJA DE CÁLCULO (BIOGÁS Y LIXIVIADO)**

La hoja de cálculo está distribuida en 10 planillas, cada una de ellas para desarrollar una tendiente al diseño, construcción, cálculo de la proyección de biogás y lixiviado generado, construcción de la celda, diseño de canales perimetrales, instalación de geomembrana, costos de operación, calculo de tarifa de disposición final y costos mensuales de operación, conforme a su nombre, por ejemplo, la planilla población está diseñada para realizar la proyección de la población y para calcular el volumen de celda que se requiere durante un año de operación, la planilla Biogás fue construida para realizar la proyección de producción de Biogás dentro del relleno sanitario, basado en la composición de los residuos y para la distribución en el tiempo de la producción se aplica la metodología de distribución triangular, la tercera planilla llamada Lixiviado sirve para realizar el cálculo de la producción o generación de lixivados en el relleno sanitario, en función de la meteorología del lugar, la humedad inicial del residuo, la altura del relleno y el tipo de material de cobertura, finalmente la planilla Resumen presenta las tablas de resultados numéricos de las proyecciones de producción de biogás y lixivados junto con sus respectivas graficas. Cabe recordar que los cálculos de biogás esta realizados tomando una base de 1 kilogramo (1 kg) de residuos dispuestos en la celda y los cálculos de lixivados están hechos tomando como base 1 metro cuadrado (1 m<sup>2</sup>) de área de la celda.

### **6.1.1 Planilla número 1, Población.**

Dentro de esta planilla se solicita al usuario la siguiente información:

Municipio, Departamento, País, año, población, PPC Producción Per cápita de residuos, Tasa de crecimiento poblacional anual expresada como porcentaje, Profundidad de la celda del relleno sanitario dada en metros, Ancho de la parte recta de la excavación, parte de la celda que no presenta talud, expresado en metros, talud de la excavación referido así, Vertical:Horizontal, Peso específico de los residuos compactados dentro de la celda del relleno sanitario, es decir después de que el equipo de compactación (generalmente un Buldozer) ha realizado el debido trabajo sobre los residuos dispuestos en la celda, expresado en kg/m<sup>3</sup>. Toda esta información esta resaltada en color amarillo pálido y constituye la información principal de entrada a esta hoja de cálculo. Las casillas en color azul claro generalmente son información de entrada que debe digitar el usuario, las casillas sin color son casillas en las cuales se realiza en calculo mediante una fórmula programada según la información de entrada, Se pueden observar algunos cuadros de color verde claro, en medio de estos cuadros el usuario encontrara cuadro extraídos del RAS 2000, que le permitirán identificar el nivel de complejidad del municipio para el cual se aplica los cálculos de la hoja y

también determinar la PPC promedio recomendada, en caso de no tener información específica del municipio; en la parte final de la planilla se encuentra dos gráficos que esquematizan la configuración que se debe dar a la celda que se construya.

Una vez el usuario Ingrese la información solicitada en las celdas de color amarillo pálido, la planilla permitirá al usuario ver la proyección de población a 30 años, también le permitirá ver la proyección de producción de residuos y basado en la geometría que el operador de la planilla de un las celdas de información, la planilla calculara la longitud de la celda y el área que se requiere anualmente para la disposición final de los residuos sólidos del lugar que se esté analizando.

### **6.1.2 Planilla 2, Diseño.**

Tomando la información calculada en la planilla anterior, es decir la población actual y la población proyectada, se plantea el diseño de la celda, en esta hoja de cálculo es fundamental tener en cuenta que se realiza el cálculo para el primer año de operación del relleno sanitario.

Para los siguientes años de operación se debe calcular nuevamente la celda para la producción de residuos del año posterior. El cálculo del volumen de la piscina para evaporación y concentración de lixiviados depende da las características meteorológicas del lugar donde se desee construir el relleno sanitario.

La altura de la celda se toma de en dos partes, la primera profundidad corresponde a la profundidad de la excavación y la segunda corresponde al nivel al cual quedara la celda, es decir a la altura sobre el nivel del suelo a la cual se desea elevar los residuos en la disposición, se debe realizar el cálculo de esta manera para establecer con precisión la cantidad de geomembrana que se requiere para la impermeabilización y el volumen total de la celda. De igual manera de plantea la altura para la piscina de lixiviados.

Como en las demás planillas que conforman la hoja de cálculo, las casillas en color son valores que deben ser ingresados y las casillas sin color contiene los resultados de los cálculos.

Se plantea para el diseño de los filtros y chimeneas que la separación entre chimeneas sea de 30 metros, de manera que se pueda calcular con facilidad la cantidad de cantidad de tierra que se debe remover para las zanjas que conforma los filtros y determinar os metros de tubería perforada que conforman el filtro, así como el volumen de piedra necesario para la construcción de la red de filtros en el fondo de la celda.

La plantilla *Diseño* realiza el cálculo de los costos de operación y el tiempo teórico aproximado de duración de la obra (excavación de la celda y la piscina de lixiviados). Se plantea dentro de la planilla la instalación de una capa de arcilla antes de la instalación de geomembrana, de no requerirse la instalación de arcilla se debe colocar como espesor de la capa de arcilla el valor cero, de manera que la hoja de cálculo haga nulo este cálculo dentro de los costos de construcción.

Los precios contemplados en esta hoja de cálculo son valores promedio para el año 2009, lo que implica que el usuario de la hoja de cálculo deba modificar estos valores dependiendo del año en que se empleen los datos de la planilla o según el año para el cual se esté haciendo la proyección de costos.

### **6.1.3 Planilla número 3, Biogás**

Esta planilla permite calcular la cantidad de biogás generado en la celda del relleno sanitario, los cálculos se realizan como base de cálculo un kilogramo de residuos dispuestos en el relleno sanitario, es decir que para tener el dato aproximado de la cantidad de gas generado en un año específico en el relleno sanitario, se debe multiplicar el dato de tasa de producción por los kilogramos de residuos dispuestos durante el año de operación del relleno sanitario.

Para diligenciar la planilla, el usuario debe tener en cuenta que los datos de las celdas en color azul son datos que deben ser ingresados y los datos que están en casillas sin color, son resultados de cálculos de la planilla.

Los datos que aparecen en celdas de color verde pálido, son valores característicos de humedad y composición porcentual de elementos químicos según el tipo de residuo, es evidente que estos datos pueden variar de una región a otra, lo que indica que si el usuario de la hoja de cálculo cuenta con esta información, lo más recomendable es ingresarla a la planilla, de no ser así, se recomienda utilizar los datos proporcionados por la planilla. Se recomienda al usuario de la planilla ingresar los datos en las celdas de color azul y si es el caso los de las celdas de color verde pálido (si dispone de la información) una vez ingresada la información se debe desplazar al final de la hoja de cálculo para observar la gráfica que muestra el comportamiento de la generación de gas, año a año y la tabla que resume los datos de generación y su distribución. Antes de ir a los resultados se debe verificar que todas las casillas de color azul en las cuales se deben ingresar datos sean diligenciadas con los datos propios de los residuos que se están analizando, de no contarse con la información suficiente, se presentan en la hoja de cálculos datos sugeridos que pueden ser rechazados o aceptados según el criterio del usuario.

Para el cálculo de la cantidad de gas generado se realiza la determinación de la fórmula química mínima de los residuos, tanto los de rápida degradación como los de lenta degradación, conocida esta cantidad total de residuos por unidad de masa de residuos dispuestos, se pasa a realizar la distribución de la cantidad de gas generado, para esto se emplea el método de distribución triangular, que para el caso de los residuos de rápida degradación se asume que el proceso ocurre en 5 años y para el caso de los residuos de lenta degradación la generación de gas se asume que se presenta durante un periodo de tiempo de 15 años.

Se aclara que este el procedimiento de cálculo aplicado en esta planilla no es el método más preciso y exacto de cálculo de generación de biogás en un relleno sanitario, la complejidad de este tipo de sistemas y la influencia de diversos factores externos hacen que el cálculo exacto de la cantidad de biogás generado en un relleno sanitario sea bastante compleja, pero si se debe anotar que el método tiene una amplia aceptación para establecer de manera aproximada la cantidad de biogás generado.

También es necesario señalar que los cálculos son realizados para los residuos dispuestos

#### **6.1.4 Planilla 4, Lixiviado.**

De igual forma que en el caso de la planilla anterior se debe tener en cuenta que el usuario solo debe ingresar los datos de las celdas en color azul claro, los demás datos son traídos directamente por la planilla para ser utilizados en los respectivos cálculos.

El cálculo de la cantidad de lixiviado generado se realiza tomando una base de cálculo de 1 m<sup>2</sup> de área de celda expuesta a la lluvia y al sol, se asume que los residuos se dispuestos en la celda de manera que al final de cada año la altura de los residuos más material de cobertura sobre la celda sea de 1 m, en esta planilla de cálculo es fundamental tener en cuenta la cantidad de agua que logra infiltrarse a través de los residuos dispuestos en la celda, esta información debe ser ingresada por el usuario, se supone en la planilla de cálculo que la tasa de infiltración del agua dentro de los residuos baja significativamente después del quinto año de disposición de los residuos, debido a que durante esta época la mayor parte de la materia orgánica presente en la basura se ha degradado y por lo tanto el material está más compactado y ofrece mayor resistencia a la infiltración del agua.

La determinación de la cantidad de agua que se infiltra debe ser calculada por el usuario basándose en un balance hídrico, para lo cual se debe conocer la tasa de precipitación, evaporación.

Los cálculos se realizan hasta el año 20 de operación ya que se asume que en la mayoría de los casos se observa que la producción de lixiviado cesa aproximadamente a los 20 años de operación, se debe aclarar que este dato es analizado para celdas individuales, en otros términos, si se construyera una celda exclusiva para los residuos generados durante un año específico, y luego se clausurara, se podría decir que aproximadamente a los 20 años después de llenada la celda, la producción de lixiviado se acaba.

Dado que en algunos rellenos sanitarios una práctica normal es la instalación de geomembrana de 20 Mills para eliminar prácticamente por completo la infiltración de agua lluvia sobre los residuos dispuestos en la celda, se debe entender en este caso que los datos de *Infiltración de agua en la celda <mm>* deben ser ingresados como cero, o como una cantidad muy pequeña, lo que implica que la cantidad de lixiviado generado correspondería solamente a la cantidad de agua presente en la basura como % de humedad y que esta constituiría el lixiviado siempre y cuando se supere la capacidad de campo de los residuos, de lo contrario el lixiviado generado tendría un valor de cero ya que la cantidad de agua no superaría de la capacidad de campo y se quedaría como parte de los residuos.

Los resultados de los cálculos realizados en esta planilla son tabulados y graficados en la planilla *Resumen*, ya que los datos se realizan por cada nivel de la celda y por cada año, los datos están a lo largo de la planilla, para comodidad del usuario, se presentan los resultados en la siguiente planilla.

#### **6.1.5 Planilla 5, Resumen.**

La cuarta y última planilla que conforma la hoja de cálculo completa está destinada para la presentación de los cuadros de resumen de resultados de producción de biogás y lixiviado.

Los datos son presentados a manera de cuadro con los datos año a año y también son presentados de manera gráfica.

La gráfica de producción de biogás presenta dos curvas, la curva de color rojo es la curva acumulativa de biogás generado, como se puede ver tiene un comportamiento asintótico, esto se debe a que después de cierto periodo de tiempo la producción de biogás es nula y por lo tanto la gráfica no muestra cambios en su trazado.

La curva de color azul presenta la cantidad de biogás generado en la celda año a año, se hace evidente que la producción de biogás alcanza un valor máximo y de ahí desciende hasta que se hace nulo debido al agotamiento de la materia orgánica en la basura dispuesta en la celda.

### **6.1.6 Planilla 6, Canales Perimetrales.**

Esta planilla está planeada para realizar el dimensionamiento de los canales perimetrales para evacuación y manejo de aguas de escorrentía.

El cálculo se basa en la ecuación de Manning para el diseño de canales abiertos, la planilla presenta en la parte inferior una tabla con rangos de valores promedio del coeficiente de rugosidad de la ecuación de diseño.

Se presenta dos configuraciones diferentes para la geometría del canal, una es la del canal triangular y la otra la del canal trapezoidal, hoja de cálculo realiza por ensayo y error el cálculo del caudal que puede ser transportado por el canal para diferentes profundidades, dados una pendiente del canal, material de construcción del canal y ancho deseado del canal. El usuario o diseñador será quien por criterio técnico decida qué tipo de geometría emplear para conformar el canal

De igual forma la planilla permite determinar el volumen de excavación que se requiere para la construcción de los canales perimetrales dada cierta de longitud que daban tener los canales a lo largo del relleno sanitario.

### **6.1.7 Planilla 7, Instalación de Geomembrana.**

En esta planilla se realiza el cálculo de la longitud de geomembrana que debe ser tendida sobre el borde de la celda para realizar el anclaje de esta por medio de zanjas excavadas en tierra que luego se llenan con arena.

Se debe ingresar el talud de la excavación (V:H), la profundidad de la excavación, la profundidad y ancho de la zanja para anclaje y el espesor de la capa de arena para cobertura de la geomembrana previo al inicio de la disposición final de residuos.

Este dato es bastante importante para evitar que al momento de instalar la arena para protección de la geomembrana, esta deslice dentro de la celda. Al igual que en las demás planillas de cálculo, los datos en color azul claro son datos que deben ser ingresado por el usuario y los datos en celdas que no tiene color son los resultados de los cálculos.

### **6.1.8 Planilla 8, Horas Maquina.**

Los cálculos realizados en esta planilla se refieren a las horas de maquinaria que se requieren en un relleno sanitario a lo largo de su actividad cotidiana. Actividades como operación del relleno sanitario (compactación de residuos, colocación de material de cobertura), paisajismo y compostaje, Mantenimiento de vías y canales perimetrales y actividades varias.

Los datos solicitados en esta planilla se refieren a la forma en que los residuos serán dispuestos diariamente en la celda (espesor de la capa de residuos), espesor de la capa de material de cobertura. Número de días al mes que opera el relleno sanitario. Además se presentan datos de rendimiento de los equipos para realizar las diferentes actividades durante la operación.

Los resultados de esta hoja de cálculo son fundamentales para establecer el costo de operación del relleno sanitario.

Las horas maquina de servicio en las diferentes actividades, especialmente e, paisajismo, mantenimiento de vías y actividades varias, dependerán mucho del lugar de disposición final, del criterio del jefe del relleno sanitario y de la experiencia del diseñador principalmente, dentro de la hoja de cálculo se presentan unos datos como referencia.

Las horas de maquinaria empleadas en operación dependen principalmente de la cantidad de residuos que lleguen al relleno sanitario y se basan en los rendimiento promedio de las maquinas utilizadas en el relleno sanitario.

### **6.1.9 Planilla 9, tarifa Disposición Final.**

Los cálculos realizados en esta planilla están basados en la metodología tarifaria de la resolución 351 de 2005, de la CRA, específicamente a la parte del cálculo de la tarifa para el servicio de disposición final de residuos.

Esta metodología está basada en el establecimiento de un valor techo o valor máximo de la tarifa, el cual no puede ser sobrepasado por ningún operador del servicio de disposición final, este valor techo es establecido por la CRA basado en consideraciones operativas y económicas observadas en diversas empresas del sector del aseo en el territorio nacional.

El valor techo se debe actualizar año a año y es la CRA quien establece el nuevo valor techo de la tarifa para cada año de operación.

La fórmula aplicada en esta planilla depende del total de toneladas dispuestas en el relleno sanitario mensualmente.

Según la resolución 351 se reconocen 3 tipos de relleno sanitario.

RSU 1. Recibe 1280 Ton/día durante 20 años de operación.

RSU 2: Recibe 300 Ton/día durante 20 años de operación

RSU 3: recibe 10 Ton/día durante 20 años de operación. La metodología general de evaluación de los costos es la de calcular el costo medio por tonelada.

$$CDT = \text{Min} \left( \left( 11910 + \frac{104519468}{TA} \right); 50890 \right)$$

\$ 50890 es el valor de la tarifa máximo, o techo máximo para cualquier caso por tonelada dispuesta, este valor es calculado a precios de junio de 2004. Para el año 2009 el valor techo fue de \$ 61.000.

TA = se calcula como el máximo entre el promedio total de Ton/mes recibidas en el relleno sanitario.

$$TA = \text{Max} (F_{merc} * T; T_{recep})$$

$$T_{recep} = T, \text{ por ende, } TA = T$$

$$F_{merc} = 1.277 - 0.039 \ln(T_j) \rightarrow \text{para } T_j < 1155$$

$$F_{merc} = 1 \rightarrow \text{para } T_j \leq 1155$$

Es decir se hace el cálculo del CDT y se toma como tarifa el valor mínimo entre el resultado y el valor techo, esta será la tarifa de disposición final para el municipio objeto de estudio. En ningún caso se acepta una tarifa superior al valor techo.

Ahora bien si un municipio decide recibir los residuos de un municipio vecino se aplica la formula tarifaria para el total de residuos recibidos en el relleno sanitario. El municipio en que se encuentre ubicado el relleno sanitario por medio de la formula CDT permite dar un incentivo dado por la diferencia en el CDT entre las situación de disposición individual y disposición conjunta.

#### **6.1.10 Planilla 10, Costos de operación.**

Basado en las horas de maquinaria utilizadas en la operación del relleno sanitario, la planilla *Costos de Operación* permite determinar el costo de operación mensual del relleno sanitario.

La planilla solicita como información para los cálculos el costo de la hora de operación de cada una de las maquinas que prestan servicio en el relleno sanitario y se calcula el costo de cada actividad por cada tonelada de residuos que se dispone en el relleno sanitario.

Teniendo en cuenta los costos de operación anuales, los costos de construcción de la celda para un año de operación y los ingresos anuales por cobro del servicio de disposición final, se determina la ganancia bruta que deja anualmente el relleno sanitario.

El valor de la tarifa de disposición final es el valor calculado en la planilla anterior, en esta planilla se realiza el cálculo del ingreso anual por disposición final para el 50% del valor de la tarifa techo o tarifa máxima permitida para el cobro del servicio de disposición final.

### **6.3 PLANILLAS DE DISEÑO**

#### **Planilla No. 1. Cálculo de población**



Proyección basada en la cantidad promedio de residuos diariamente recibidos

Basura diaria *Tonelada*	12
Días de operación al mes *días/mes*	20
Basura mensual *Tonelada*	1200
Basura anual *Tonelada*	14400
Densidad de compactación *Ton/m <sup>3</sup> *	0.8
Volumen de excavación *m <sup>3</sup> /año*	20250
Rendimiento excavadora *m <sup>3</sup> /hora*	40
Horas de excavación *horas*	253.125
Valor hora de excavación *\$/hora*	\$ 130.000
Valor de excavación *\$/año*	\$ 30.375.000

Verificación de datos	Deben ser ingresados
Valor promedio de operación	Deben ser ingresados
Resultado de los cálculos	Resultados de fórmulas

Días de excavación	21.60000	JORNADAS DE TRABAJO DE 8 HORAS
Valor alquiler de volquete *\$/día*	\$ 200.000	SE REQUIEREN COMO MÍNIMO 2 VOLQUETAS PARA REALIZAR LA EXCAVACIÓN
Numero de volquetes	2	
Valor total alquiler de volquete *\$/año*	\$ 10.800.000	
Costo total de excavación *\$/año*	\$ 49.375.000	

DIMENSIONAMIENTO DE LA CELDA

	V	II
Talud	1	1,5

Profundidad de la celda para excavación (H) *m*	4
Profundidad de la celda para impermeabilización con geomembrana HDPE 40 Mila (h) *m*	6

Se calcula con esta profundidad debido que una parte de la celda será conformada con terraplen sobre la superficie del suelo

Dimensiones del fondo de la celda	
Ancho del fondo de la celda (b) *m*	30
Largo del fondo de la celda (L) *m*	75
Área del fondo de la celda (S <sub>f</sub> ) *m <sup>2</sup> *	2250
Perímetro del fondo de la celda (P <sub>f</sub> ) *m*	210

Dimensiones de la superficie de la celda	
Ancho de la superficie de la celda (b) *m*	50
Largo de la superficie de la celda (L) *m*	95
Área de la superficie de la celda (S <sub>s</sub> ) *m <sup>2</sup> *	4750
Perímetro de la superficie de la celda (P <sub>s</sub> ) *m*	290

Volumen de la celda *m <sup>3</sup> *	20250.0000
Área lateral de la celda (S <sub>l</sub> ) *m <sup>2</sup> *	4350.470400
Área a impermeabilizar *m <sup>2</sup> *	6266.8
Valor de la geomembrana (40 Mila) *\$/m <sup>2</sup> *	\$ 13.200
Costo de la impermeabilización con geomembrana HDPE 40 Mila *\$/año*	\$ 79.819.360

Capa de arcilla para cobertura de fondo de la celda

Área de la capa de capa de arcilla en el fondo de la placa *m <sup>2</sup> *	0.6
Volumen de arcilla para impermeabilización del fondo de la placa *m <sup>3</sup> *	1920.0
Valor de la arcilla *\$/m <sup>3</sup> *	\$ 40.000
Costo de la arcilla para impermeabilización del fondo de la placa *\$/año*	\$ 54.000.000

Filtros para drenaje de lixiviados hacia la cámara de exposición y concentración

Longitud de filtro que deben ser construidos *m*	150
Longitud de tubería para construcción de filtro *m*	150
Longitud de cada tubo para construcción de filtro *m*	6
Numero de tubos necesarios para la construcción de filtro *	25.000
Valor de cada tubo para construcción de filtro *\$/tubo*	\$ 122.200.0
Costo total de tuberías para construcción de filtro *\$/año*	\$ 3.055.000.0
Profundidad de la zanja para construcción de filtro *m*	0.40
Ancho de la zanja para construcción de filtro *m*	0.40
Volumen de zanja para construcción de filtro *m <sup>3</sup> *	36
Diámetro de la tubería para construcción de filtro *m*	6
Volumen ocupado por la tubería dentro de las zanjas para filtro *m <sup>3</sup> *	2.76
Volumen de piedra para la construcción de filtro *m <sup>3</sup> *	21.24
Valor de la piedra para la construcción de filtro *\$/m <sup>3</sup> *	\$ 40.000.00
Costo total de piedra para construcción de filtro *\$/año*	\$ 850.551.21

Costo total de construcción e impermeabilización de la celda \*\$/año\* \$ 188.701.046,27

## Planilla no. 3 Biogás

### Composición física de los

	peso Humedo 4 kg	% de humedad
<b>Orgánicos</b>		
Residuos de comida	25	70
Papel	5	5
Carbon	5	5
Lechías	5	10
Osma	5	2
Cuero	1	10
Residuos de jardín	15	50
Medora	5	20
Miscelaneas	1	0
Plásticos	5	2
<b>Total</b>	<b>64</b>	

### Porcentaje de biodegradabilidad de los residuos de jardín

	peso Humedo 4 kg	% de humedad
<b>inorgánicos</b>		
Vidrio	5	2
Leñas	5	5
Aluminio	5	2
Otros	2	5
Suciedad	5	5
<b>Total</b>	<b>25</b>	

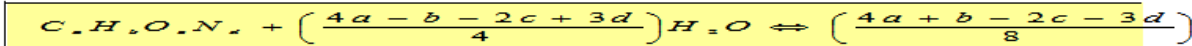
	peso Humedo 4 kg	% de humedad
<b>Rapidamente biodegradables</b>		
Residuos de comida	25	70
Papel	5	5
Carbon	5	5
Residuos de jardín	5	50
<b>Total</b>	<b>55</b>	

	peso Humedo 4 kg	% de humedad
<b>Lentamente biodegradables</b>		
Lechías	5	10
Osma	5	2
Cuero	1	10
Medora	5	20
Miscelaneas	1	0
Residuos de jardín	5	50
Plásticos	5	2
<b>Total</b>	<b>29</b>	

Como es el caso para determinar una fórmula empírica de un compuesto químico, se divide la cart. la hoja de calculo redondea automáticamente los resultados de los coeficientes estequiométricos, debajo de la r

Peso molecular 4kg/mol		
Peso de muestra biodegradable		
Lentamente biodegradable		
Despreciando el Azufre y tomando como		
Coeficientes estequiométricos para el n residuo		
Peso de muestra biodegradable		
Lentamente biodegradable		

En base a los coeficientes estequiométricos se determina la



749.8	159.17	<b>Requisitos biodegradables</b>
1	8.5	15.75
Lentamente biodegradables		
843.05	215.25	261.18 75
1	17.5	33.75

	Peso específico orgánico	Peso específico inorgánico
Metano (CH <sub>4</sub> )	0.71762521	0.2448
Dioxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	1.974212504	0.1235

Cantidad estequiométrica de gas producido a temperatura

	Gas producido cm <sup>3</sup> /h	
Metano (CH <sub>4</sub> )	11.5977149	Descomposición lenta
Dioxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	35.421074	Metano (CH <sub>4</sub> )
		Dioxido de carbono (CO <sub>2</sub> )

Cantidad total de gas producido por unidad de peso seco de mat

Descomposición rápida cm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg RS	0.89971255	RS = 8 residuos Requisitos biodegradables
Descomposición lenta cm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kg RS	1.06534079	

Distribución de la producción de gases para el periodo de operación  
En este caso se empleara la metodología de distribución fraccionada de la producción de biogás en anaerobio en función, en este método y que la máxima cantidad de producción de gas sea al final del segundo año de operación, es decir, se distribuye de manera fraccionada y se suma que la descomposición de los residuos de materia biodegradable total se termina al quinto año de operación

Final del año de operación	Tasa de producción cm <sup>3</sup> /kg/año	Producción de gas cm <sup>3</sup> /h
1	0	0.179 856271
2	0.359612542	0.314 922475
3	0.53921407	0.324 845329
4	0.718815611	0.324 867203
5	0.898417146	0.044 989058
6	0	
<b>Total</b>		<b>0.899 761255</b>

% de material disponible para la producción	75
% de material disponible para la producción en la	20

Descomposición en la	De producción (m³)
Material (D)	0,00000000
Costo de la materia (C)	1,00000000

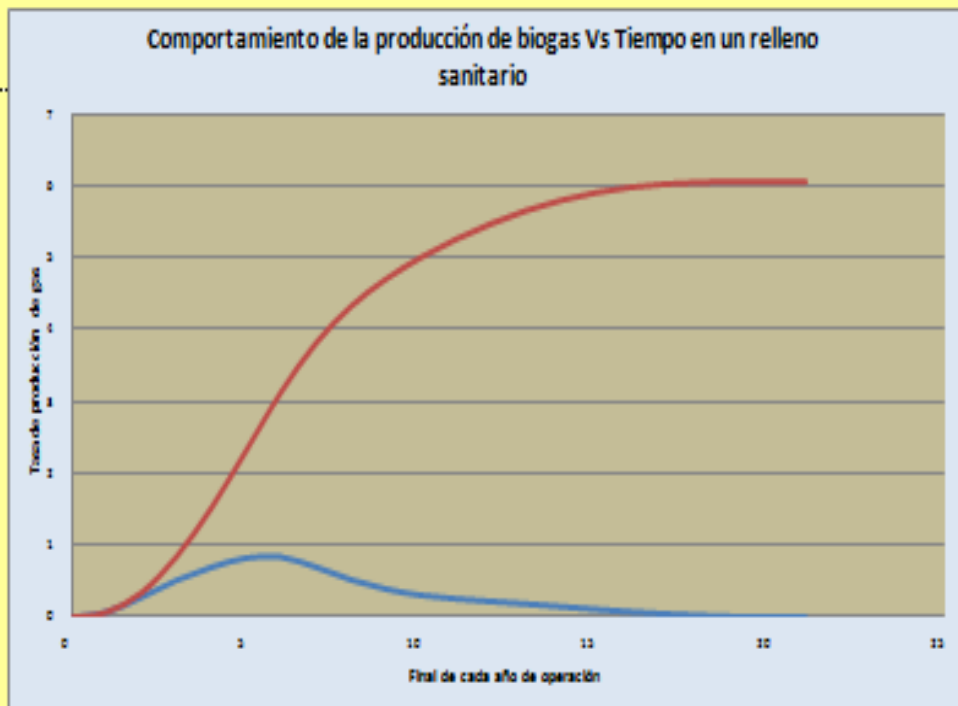
Descomposición en la	De producción (m³)
Material (D)	1,00000000
Costo de la materia (C)	0,00000000

Descomposición en la (m³) (q. P)	0,00000000	P&A - Residuos Múltiples Utilizados
Descomposición en la (m³) (q. P)	0,00000000	
Que se convierte en la producción de gas (q. P)	0,00000000	

Realidad de la operación	Residuos Residuales Indeseables		Residuos Residuales Indeseables	
	Tasa de producción (m³/kg. T/h)	Producción (kg/m³)	Tasa de producción (m³/kg. T/h)	Producción de gas (m³)
0	0	0	0	0
1	0	0,00000000	0	0,00000000
2	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
3	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
4	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
5	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
6	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000
7			0,00000000	0,00000000
8			0,00000000	0,00000000
9			0,00000000	0,00000000
10			0,00000000	0,00000000
11			0,00000000	0,00000000
12			0,00000000	0,00000000
13			0,00000000	0,00000000
14			0,00000000	0,00000000
15			0,00000000	0,00000000
16			0,00000000	0,00000000
17			0,00000000	0,00000000
18			0,00000000	0,00000000
19			0,00000000	0,00000000
20			0,00000000	0,00000000
Total		0,00000000		0,00000000

Realidad de la operación	Producción de gas en el horno con la misma estructura del sistema de Total de residuos disponibles			
	0	1	2	3
0	0	0	0	0
1	0	0	0	0
2	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
3	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
4	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
5	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
6	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
7	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
8	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
9	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
10	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
11	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
12	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
13	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
14	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
15	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
16	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
17	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
18	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
19	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000
20	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,00000000

230			
231	19		
232			
233	20		
234			
235	21		
236			
237			
238	<b>Final del año de operación</b>	<b>Producción de gas cm<sup>3</sup></b>	<b>Acumulado cm<sup>3</sup></b>
239	0	0	0
240	1	0,074105302	0,074105302
241	2	0,274127400	0,348232702
242	3	0,502527455	0,850760157
243	4	0,684026022	1,534786179
244	5	0,806450100	2,341236279
245	6	0,892226564	3,233462843
246	7	0,9495450	4,182997843
247	8	0,99075017	5,173748013
248	9	0,99954974	6,173297753
249	10	0,99990051	7,173197263
250	11	0,999924610	8,173172613
251	12	0,99996016	9,173152613
252	13	0,99999019	10,173142613
253	14	0,99999911	11,173137213
254	15	0,99999990	12,173133629
255	16	0,99999995	13,173131613
256	17	0,99999997	14,173130629
257	18	0,99999997	15,173130344
258	19	0,99999999	16,173130344
259	20	0,99999999	17,173130344
260	21	0	17,173130344
261			
262			



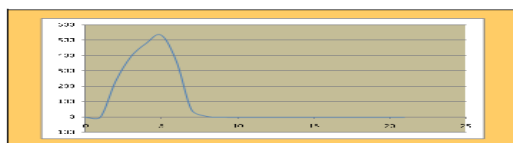
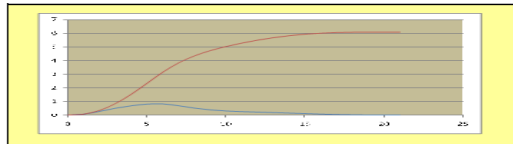




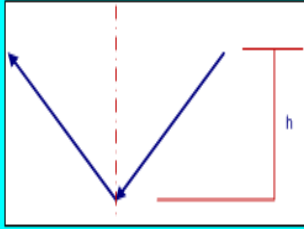
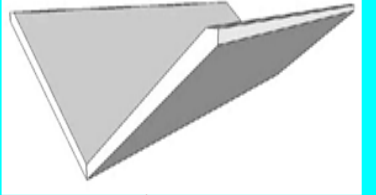
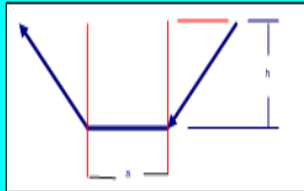
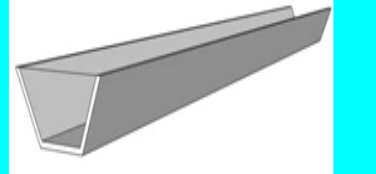
### Planilla No5. Resumen

Final del año de operación	Producción de gas <math>m^3</math>	Acumulado <math>m^3</math>
0	0	0
1	0,071105382	0,071105382
2	0,271172408	0,34227779
3	0,502597455	0,844875245
4	0,681026022	1,525901267
5	0,806458108	2,332359374
6	0,819226561	3,151585935
7	0,68435158	3,835937515
8	0,510875017	4,346812532
9	0,383151374	4,729963906
10	0,301180651	5,031144557
11	0,253524618	5,284669176
12	0,217306816	5,501975992
13	0,181089013	5,683065005
14	0,144871211	5,827936215
15	0,108653408	5,936589623
16	0,074246486	6,010836119
17	0,045272253	6,056108372
18	0,023541572	6,079649944
19	0,009054451	6,088704394
20	0,00181089	6,090515284
21	0	6,090515284

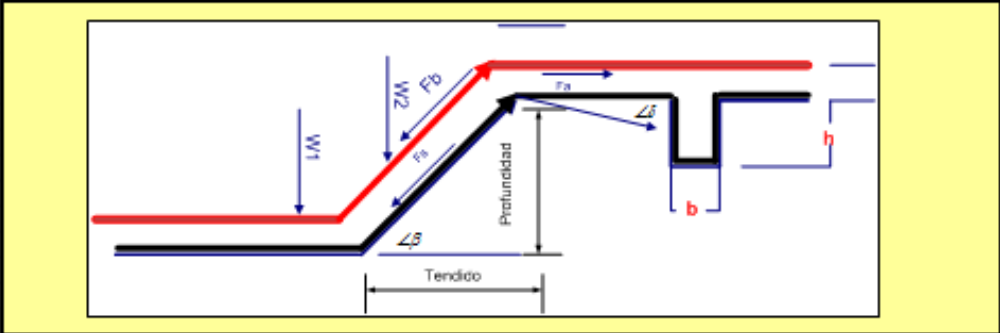
Final del año de operación	Lixiviado producido <math>Kg</math>
0	0
1	0
2	231,7902424
3	390,5998474
4	477,0463603
5	531,9611198
6	362,5557141
7	47,51484577
8	6,136255732
9	0,84563654
10	0,07248777
11	0
12	0
13	0
14	0
15	0
16	0
17	0
18	0
19	0
20	0



## Planilla no 6. Canales perimetrales

A	B	C	D	E	F	G	H	I	
<b>Para canales Triangulares</b>									
	V	H							
Talud del canal	1	2,5							
Angulo del talud con la vertical <>	68,19859052								
Coeficiente de rugosidad (n) <>	0,045								
Pendiente del canal (S) <>	0,01								
<b>Profundidad (h) &lt;cm&gt;</b>	<b>Ancho (a) &lt;cm&gt;</b>	<b>Área mojada &lt;cm²&gt;</b>	<b>Perimetro humedo &lt;cm&gt;</b>	<b>Radio hidraulico &lt;cm&gt;</b>	<b>Velocidad del agua en el canal &lt;cm/s&gt;</b>	<b>Caudal &lt;cm³/s&gt;</b>	<b>Longitud de canal &lt;cm&gt;</b>	<b>Volumen de excavación &lt;cm³&gt;</b>	
0,1	0,5	0,025	0,538516481	0,046423835	0,287043792	0,007176095	100	2,5	
0,25	0,5	0,15625	1,346291202	0,116059586	0,528739186	0,082615498	100	15,625	
0,5	0,5	0,625	2,692582404	0,232119173	0,839321141	0,524575713	100	62,5	
0,75	0,5	1,40625	4,038873605	0,348178759	1,099821828	1,546624446	100	140,625	
1	0,5	2,5	5,385164807	0,464238345	1,332339262	3,330849155	100	250	
1,25	0,5	3,90625	6,731456009	0,580237932	1,54604276	6,039229532	100	390,625	
1,5	0,5	5,625	8,077747211	0,696357518	1,745858327	9,820453092	100	562,5	
<b>Para canales Trapezooidales</b>									
	V	H							
Talud del canal	1	2,5							
Angulo del talud con la vertical <>	68,19859052								
Coeficiente de rugosidad (n) <>	0,045								
Pendiente del canal (S) <>	0,01								
<b>Profundidad (h) &lt;cm&gt;</b>	<b>Ancho (a) &lt;cm&gt;</b>	<b>Área mojada &lt;cm²&gt;</b>	<b>Perimetro humedo &lt;cm&gt;</b>	<b>Radio hidraulico &lt;cm&gt;</b>	<b>Velocidad del agua en el canal &lt;cm/s&gt;</b>	<b>Caudal &lt;cm³/s&gt;</b>	<b>Longitud de canal &lt;cm&gt;</b>	<b>Volumen de excavación &lt;cm³&gt;</b>	
0,1	0,5	0,075	0,874165739	0,085796087	0,432280662	0,03242105	100	7,5	
0,25	0,5	0,28125	1,435414347	0,195936456	0,749659965	0,210841685	100	28,125	
0,5	0,5	0,875	2,370828693	0,369069264	1,143385653	1,000462446	100	87,5	
0,75	0,5	1,78125	3,30624304	0,538753497	1,471343995	2,620831491	100	178,125	
1	0,5	3	4,241657387	0,707270703	1,764051522	5,292154566	100	300	
1,25	0,5	4,53125	5,177071733	0,87525347	2,033340201	9,213572785	100	453,125	
1,5	0,5	6,375	6,11248608	1,04294716	2,285400704	14,56942349	100	637,5	

## Planilla No 7. Instalación geomembrana

Longitud de membrana sobre el talud antes del anclaje											
3					Espesor <mm>	$\sigma_c$ <kg/cm <sup>2</sup> >					
4	Tipo de Geomembrana	HDPE	20	0,500							
5	Tipo de Geomembrana	HDPE	30	0,750							
6	Tipo de Geomembrana	HDPE	40	1,016	1440						
7	Tipo de Geomembrana	HDPE	60	1,500							
8	Tipo de Geomembrana	HDPE	80	2,000							
9	Tipo de Geomembrana	HDPE	100	2,500							
11	V	H									
12	Talud de la celda:	1	3								
15	Talud	Profundidad	Tendido	Angulo $\beta$	h <m>	h' <m>	K <sub>o</sub>	$\gamma$	$\delta$	$\sigma_c$	L <sub>a</sub> <m>
16	1 a 3	4,0	12,0	18,4	0,5	0,5	0,5	1700,0	20,0	1440,0	1,7
18	Vease la figura para identificar graficamente las variables del sistema										
19	h = Altura de la trinchera para anclaje de la geomembrana										
20	h' = Altura de tierra sobre la geomembrana										
21	s = Densidad lineal de la geomembrana										
22	$\gamma$ = Densidad del material de cobertura										
23	K <sub>o</sub> = Coeficiente de presión de la tierra										
24	$\delta$ = Angulo del terreno sobre el talud en radianes										
25	$\beta$ = angulo del talud en radianes										
26	Profundidad = Se refiere a la profundidad de la celda dada en metros										
27	Tendido = Se refiere a la distancia horizontal del talud										
29											
44	Fuente. Design of landfills and integrated solid waste management. AMALENDU BAGCHI. 2004. Editorial John Wiley & Sons.										

## Planilla número 8. Horas máquinas

1	<b>Horas diarias de operación de maquinaria para el primer día de las 30 días de operación</b>			
2				
3				
4	Cantidad diaria de residuo a tratar (Ton/día):			45
5	Volumen de residuo a tratar (m <sup>3</sup> /día):			56,25
6	Espesor capa de residuo (cm):			0,5
7	Área de residuo compactado (m <sup>2</sup> /día):			112,5
8	Espesor de capa de cobertura (cm):			0,1
9	Volumen de material de cobertura (m <sup>3</sup> /día):			11,25
10	Para especifica del suelo:			1770
11	Mara de material de cobertura:			19,9125
12	Días de trabajo al mes (días/mes):			30
13				
14	<b>Maquinaria</b>	<b>Unidad</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Actividad</b>
15	Buldozer D6 azimilador	Ton/hora	50	Compactación de residuo
16	Valqueta	m <sup>3</sup> /hora	40	Transporte de material de cobertura, valqueta con capacidad de 5 m <sup>3</sup>
17	Retraexcavadora	m <sup>3</sup> /hora	30	Excavación de tierra
18	Buldozer D6 azimilador	H/hora	1	Dormante, Descapote, excavación de talud
19	Valqueta	m <sup>3</sup> /hora	40	Transporte de material de cobertura, valqueta con capacidad de 5 m <sup>3</sup>
20	Retraexcavadora	m <sup>3</sup> /hora	100	Carque de material, volteo de material
21				
22				
23	<b>1. Operación</b>			
24				
25	<b>Actividad</b>	<b>Maquina</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Horas de operación charar/día</b>
26	Compactación	Buldozer D6 azimilador	50	0,90
27	Carque de Cobertura	Retraexcavadora	30	0,14
28	Transporte de cobertura	Valqueta	40	0,28
29	Compactación de cobertura	Buldozer D6 azimilador	50	0,40
30				
31	<b>2. Peaje y compartaje</b>			
32	Según requerimiento del operador del rollo			
33				
34	<b>Actividad</b>	<b>Maquina</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Horas de operación charar/día</b>
35	Descapote	Buldozer D6 azimilador		5,00
36	Carque y volteo de material	Retraexcavadora		5,00
37	Transporte de material	Valqueta		10,00
38				
39	<b>3. Canal, Filtros perimetral, Vía</b>			
40	Según requerimiento del operador del rollo			
41				
42	<b>Actividad</b>	<b>Maquina</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Horas de operación charar/día</b>
43	Arreglo de vía	Buldozer D6 azimilador		20,00
44	Construcción de zanjas y canales	Retraexcavadora		5,00
45	Transporte de material	Valqueta		10,00
46				
47	<b>4. Varir</b>			
48	Según requerimiento del operador del rollo			
49				
50	<b>Actividad</b>	<b>Maquina</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Horas de operación charar/día</b>
51	Varir	Buldozer D6 azimilador		10,00
52	Varir	Retraexcavadora		5,00
53	Varir	Valqueta		10,00
54				
55				
56				
57				
58				
59				
60				
61				
62				
63				
64				
65				
66				
67				
68				
69				
70				
71				
72				
73				
74				
75				
76				
77				
78				
79				
80				

### Planilla No. 9. Tarifas de disposición final

3	Resolución CRA, 351 Junio de 2005,		$CDT = \text{Min} \left( \left( 11910 + \frac{104519468}{TA} \right); 50890 \right)$ $F_{merc} = 1.277 - 0.039 \ln(T_j) \rightarrow \text{para } T_j < 1155$ $F_{merc} = 1 \rightarrow \text{para } T_j \leq 1155$ $T_{recep} = T, \text{ por ende, } TA = T$
4	Toneladas dispeptas mensualmente (T) <Ton/mes>	1368,75	
5	F <sub>merc</sub>	0,99535553	
6	TA <Ton/mes>	1362,39288	
7	Valor techo para el año de analisis <\$/Ton>	61000	
8	CDT <\$/Ton>	61000	
9			
10			

## Planilla No. 10 Costo de Operación

### Cálculo de costo de operación mensual, para el primero de los 30 años de operación

#### 1. Operación

Equipo	Horas trabajadas <hora>	Valor hora <\$/hora>	Valor parcial <\$>	Toneladas dispuestas <ton>
Buldozer D5, D6 o similar	38,95	\$ 100.000	\$ 3.894.750	1368,75
Retroexcavadora	4,22	\$ 120.000	\$ 506.250	
Volqueta	8,44	\$ 37.500	\$ 316.406	
<b>Total</b>			<b>\$ 4.717.406</b>	

#### 2. paisajismo, compostaje

Equipo	Horas trabajadas <hora>	Valor hora <\$/hora>	Valor parcial <\$>	Toneladas dispuestas <ton>
Buldozer D5, D6 o similar	5,00	\$ 100.000	\$ 500.000	1368,75
Retroexcavadora	5,00	\$ 120.000	\$ 600.000	
Volqueta	10,00	\$ 37.500	\$ 375.000	
<b>Total</b>			<b>\$ 1.475.000</b>	

#### 3. Canales, Filtros perimetrales, Vías

Equipo	Horas trabajadas <hora>	Valor hora <\$/hora>	Valor parcial <\$>	Toneladas dispuestas <ton>
Buldozer D5, D6 o similar	20,00	\$ 100.000	\$ 2.000.000	1368,75
Retroexcavadora	5,00	\$ 120.000	\$ 600.000	
Volqueta	10,00	\$ 37.500	\$ 375.000	
<b>Total</b>			<b>\$ 2.975.000</b>	

#### 4. Varios

Equipo	Horas trabajadas <hora>	Valor hora <\$/hora>	Valor parcial <\$>	Toneladas dispuestas <ton>
Buldozer D5, D6 o similar	10,00	\$ 100.000	\$ 1.000.000	1368,75
Retroexcavadora	5,00	\$ 120.000	\$ 600.000	
Volqueta	10,00	\$ 37.500	\$ 375.000	
<b>Total</b>			<b>\$ 1.975.000</b>	

#### Costo de construcción y operación para el año 1

Año 1	
Costo Anual de Operación	<b>\$ 133.708.875,00</b>
Costo de Construcción de la celda, incluyendo impermeabilización	<b>\$ 186.701.046,27</b>
<b>Total</b>	<b>\$ 320.409.921,27</b>

<b>Valor techo para tarifa de disposición final</b>	<b>\$ 61.000,00</b>
---	---------------------

<b>Valor tarifa por disposición final a cobrar</b>	<b>\$ 30.500,00</b>
--	---------------------

Cobrando el 50% del valor de la tarifa máxima permitida

<b>Ingreso anual por disposición final</b>	<b>\$ 500.962.500,00</b>
--	--------------------------

<b>Ganancia bruta por disposición final</b>	<b>\$ 180.552.578,73</b>
---	--------------------------

