

01177



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

9  
Zef.

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

TESIS

CRITERIOS DE SELECCIÓN DE CAPAS  
IMPERMEABLES EN RELLENOS  
SANITARIOS

P R E S E N T A D A P O R :  
JAIME ZEFERINO GUTIÉRREZ LEGORRETA

PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA  
(AMBIENTAL)

DIRIGIDA POR:  
M. en I. FRANCISCA I. SOLER ANGUIANO



CIUDAD UNIVERSITARIA

ENERO 1998

258356

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

## DEDICATORIAS:

- ◆ A la luz del mundo, que ilumina la vida de todos los hombres.
- ◆ A mi madre Victoria Alicia Legorreta Villarreal, quien con su amor y fortaleza ha establecido los parámetros a seguir en nuestra familia. Te amo.
- ◆ A mis hermanos José, Aurora, Juan Fermín, Gabriela y Raymundo, quienes me han apoyado incondicionalmente y han sido siempre pacientes. Los amo profundamente.
- ◆ A Mariana B. Kuhn Álvarez, quien es responsable de la terminación de este trabajo. Gracias por tu apoyo, amor y comprensión a lo largo de todo este tiempo. Hiciste menos difícil el camino.
- ◆ Al Dr. Alfonso García Gutiérrez, formador de conciencias, nuevos caminos y alternativas, no sólo profesor de posgrado. Sus alumnos de la generación 94, reconocemos su trabajo e influencia en nuestras vidas.
- ◆ A la M.I. Francisca Soler Anguiano, quien hizo posible que este trabajo llegara a buen término. Sin su amor a este proyecto, hubiera sido imposible terminarlo. Gracias.
- ◆ Al Ing. Salvador Camacho Santoyo. Su interés y aportaciones a este trabajo, hicieron posible el perfil del mismo. Gracias.
- ◆ Al Lic. Fermín Legorreta Villarreal. Agradezco el tiempo dedicado solamente a mí, para que entendiera la importancia de hacer las cosas de la mejor manera posible.
- ◆ A la Lic. Concepción Andalco Aguilar. Gracias por tu amor y apoyo.
- ◆ A Abelino Villarreal Gutiérrez, quien creó en mi la inquietud de estudiar en la Universidad Nacional. Gracias.
- ◆ Al Ing. Alejandro Cadaval Torres, quien ha seguido y apoyado mi trayectoria. Profesor, éste trabajo también es tuyo.
- ◆ Al Lic. Enrique Fabián Cervantes, gracias por su interés en mi a lo largo de estos años.
- ◆ A Sergio Martínez Manjarrez, amigo y compañero. Tu apoyo hizo posible la terminación de este trabajo.
- ◆ A Everardo Arellano, quien me ayudó a encontrar mi responsabilidad. ✚

## **AGRADECIMIENTOS:**

- ◆ A mis sinodales, Jaime Martínez Mier, Salvador Díaz Díaz, Francisca Soler Anguiano, Alfonso García Gutiérrez y Constantino Gutiérrez Palacios, sus aportaciones a este trabajo.
- ◆ A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional, por la formación recibida.
- ◆ A mis compañeros de la generación 94 de ingeniería ambiental y construcción.
- ◆ Al pueblo de México, quien por medio del CONACYT otorgó los recursos económicos para que realizara mis estudios de maestría.

# ÍNDICE GENERAL

<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>ANTECEDENTES</b>	3
<b>1. CAPÍTULO 1 - EL RELLENO SANITARIO COMO SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL</b>	7
1.1. El Relleno Sanitario	9
1.2. Los Residuos Sólidos Municipales	10
1.3. La Producción de los Residuos Sólidos Municipales y la Determinación de la Superficie del Relleno Sanitario	11
1.4. El Volumen Diario y Anual de los Residuos Sólidos Municipales a Disponer	12
<b>2. CAPÍTULO 2 - MAQUINARIA PARA RELLENOS SANITARIOS</b>	15
2.1. Equipos de Construcción	17
2.2. Productividad y Eficiencia del Equipo	17
2.3. Selección del Equipo	17
2.4. Equipos Utilizados en Movimientos de Tierras y Rellenos Sanitarios	18
2.5. Determinación del Costo Horario de Equipos.	21
<b>3. CAPÍTULO 3 - LA LEGISLACIÓN AMBIENTAL EN LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA Y EN LA REPÚBLICA MEXICANA</b>	27
3.1. Legislación Ambiental en los Estados Unidos de América	29
3.1.1. Leyes que Rigen el Cuidado del Ambiente	29
3.1.2. Ley de Recuperación y Conservación de Recursos de 1976.	30
3.1.3. Ley de Recuperación y Conservación de Recursos, Subtítulo D en lo Referente a los Sitios de Disposición para Residuos No Peligrosos.	30
3.2. Legislación Ambiental en la República Mexicana	39
3.2.1. Ley que Rige el Cuidado del Ambiente.	39
3.2.2. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Relación a los Sitios de Disposición Final.	40
3.2.3. Ley de Adquisiciones y Obras Públicas	41
3.2.4. Normas Técnicas Ecológicas Sobre los Sitios de Disposición Final.	43
<b>4. CAPÍTULO 4 - EL USO DE CAPAS IMPERMEABLES EN LOS RELLENOS SANITARIOS</b>	53
4.1. Requisitos para el uso de Barreras Impermeables	55
4.1.1. Permeabilidad	55
4.2. Las Arcillas	56
4.2.1. La Estructura de las Arcillas	56
4.2.2. Capacidad de Intercambio Catiónico	58
4.2.3. Minerales de Arcilla Utilizados para las Barreras Impermeables	59
4.2.4. La Compactación de las Barreras Impermeables Naturales	60
4.2.5. El Control de Calidad en la Construcción de las Barreras Arcillosas	60
4.2.6. Problemas Comunes de las Barreras Impermeables Naturales	62
4.2.7. Procesos Químicos, Físicos y Biológicos entre la Arcilla y los Lixiviados	62
4.3. Geomembranas	63

4.3.1. Propiedades	64
4.3.2. Selección	67
4.3.3. Interacción de la Geomembrana con Suelos y Geosintéticos	71
4.3.4. Anclaje de las Geomembranas	72
4.3.5. Sistemas para Unión de Geomembranas	74
4.3.6. Preparación de las Geomembranas en Campo	75
4.3.7. Proceso General de Control de Calidad en Campo	76
4.4. Tipos de Enlaces	80
4.4.1. Fallas que pueden Presentarse en la Geomembrana	92
4.4.2. Estabilidad de Taludes en los Rellenos Sanitarios	97
4.4.3. Estabilidad del Suelo de Cubierta que Protege a la Geomembrana	99
<b>5. CAPÍTULO 5 - SISTEMAS IMPERMEABLES PARA LA CUBIERTA Y LA BASE DEL RELLENO.</b>	101
5.1. El Sistema de Cubierta	103
5.2. Los Sistemas Impermeables para la Base del Relleno	107
5.2.1. El Sistema Convencional	107
5.2.2. El Sistema Doble	108
<b>6. CAPÍTULO 6 - DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y COSTOS POR DISPOSICIÓN</b>	113
6.1. Diseño de los Sistemas para la Base y la Cubierta	115
6.1.1. Especificaciones Técnicas para las Barreras Naturales	118
6.1.2. Especificaciones Técnicas para las Geomembranas	118
6.1.3. Especificaciones Técnicas para las Georedes, Geomallas y Filtros Naturales	119
6.2. Construcción	120
6.2.1. Actividades y Equipos	120
6.3. Costos por Disposición	120
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>	125
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	129
<b>GLOSARIO</b>	137
<b>APÉNDICES</b>	

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### Gráficas

A.1.	Manejo integral de los residuos sólidos municipales en Estados Unidos	4
A.2.	Manejo integral de los residuos sólidos municipales en Alemania	4
A.3.	Manejo integral de los residuos sólidos municipales en Francia	4
A.4.	Manejo integral de los residuos sólidos municipales en Suecia	5
A.5.	Manejo integral de los residuos sólidos municipales en Japón	5
A.6.	Manejo integral de los residuos sólidos municipales en México	6
6.1.	Costos por disposición considerando la adquisición de todos los insumos	122
6.2.	Costos por disposición considerandi la existencia de arcilla en el sitio de disposición	123

### Figuras

1.1.	Perfil convencional del relleno sanitario	9
4.1.	Estructura extremas de la arcilla	58
4.2.	Determinación del espesor de la geomembrana	70
4.3.	Esfuerzos en el anclaje	73
4.4.	Diagrama de flujo para el control de calidad en campo	77
4.5.	Enlace mediante tira de extrusión	80
4.6.	Pistola para cintas de extrusión	81
4.7.	Traslape de extrusión	82
4.8.	Soldadura de extrusión para unión en el sitio	82
4.9.	Fusión de pista simple	83
4.10.	Fusión de doble pista	84
4.11.	Cuña de enlace	84
4.12.	Equipo manual de aire caliente	87
4.13.	Equipo automático para enlace por aire caliente	87
4.14.	Tipos de fallas posibles en el talud	98
4.15.	Fuerzas que actúan en los taludes con barreras de espesor constante	99
4.16.	Fuerzas que actúan en los taludes con barreras de espesor variable	100
5.1.	Sistema de cubierta convencional	105
5.2.	Sistemas de cubierta a base de geomembrana de bentonita	107
5.3.	Perfil del sistema convencional para la base del relleno sanitario	108
5.4.	Perfil del sistema doble	109

## Tablas

2.1.	Abundamiento y contracción de materiales	18
2.2.	Composición del costo horario	22
3.1.	Criterios que deben cumplir los sitios de disposición final en Estados Unidos	31
3.2.	Lineamientos para los sitios de disposición en la República Mexicana	44
4.1.	Familias de minerales de la arcilla	57
4.2.	Relaciones entre minerales de arcilla capacidad de intercambio catiónico y sensibilidad a sustancias presentes en rellenos sanitarios	59
4.3.	Ángulo de fricción entre geomembrana y suelo	71
4.4.	Ángulo de fricción entre geotextil y geomembrana	71
4.5.	Ángulo de fricción entre geotextil y suelo	72
4.6.	Sistemas de enlace para los diferentes tipos de geomembrana	74
4.7.	Rango de temperatura para el enlace mediante cuña	85
4.8.	Rango de temperaturas para enlace utilizando aire caliente	88
4.9.	Falla en uniones realizadas con sustancias químicas	92
4.10.	Falla en uniones realizadas con sustancias químicas en geomembranas reforzadas.	93
4.11.	Falla en uniones realizadas con extrusión	94
4.12.	Falla en uniones realizadas con cuña simple	96
4.13.	Falla en uniones realizadas con cuña dual	97
5.1.	Permeabilidad en diferentes sistemas impermeables	110
6.1.	Sistema convencional recomendado por las OPS	115
6.2.	Sistema convencional tradicional	115
6.3.	Sistema doble construido a base de barreras naturales y HDPE	116
6.4.	Sistema doble construido en la exterior a base de arena y HDPE	116
6.5.	Sistema doble construido en la parte superior a base de geomembranas de bentonita y HDPE	117
6.6.	Sistema tradicional de cubierta	117
6.7.	Sistema de cubierta alternativo	117
6.8.	Sistema de cubierta compuesto	118
6.9.	Costos por combinación de sistemas	121
6.10.	Resumen de costos por sistemas combinados	122



## INTRODUCCIÓN

Actualmente, México enfrenta un considerable atraso en relación a las técnicas para la construcción de rellenos sanitarios. Los sistemas de barreras impermeables para la base y la cubierta señalados en la legislación mexicana, no cumplen con los parámetros mínimos internacionales señalados por la Organización Panamericana de la Salud (OPS). Por otra parte, la falta de información para la selección de los materiales y los equipos, impiden conocer claramente las ventajas que presenta las diferentes alternativas desarrolladas a nivel mundial, todo lo anterior dificulta la construcción de este tipo de obras.

El presente trabajo muestra las tecnologías utilizadas para construir las barreras impermeables de los rellenos sanitarios, analiza el costo directo de construcción y la eficiencia de las barreras propuestas, especifica las características de la maquinaria y equipos utilizados para la construcción, muestra los diferentes tipos de materiales empleados para elaborar los sistemas de la base y la cubierta.

La investigación no contempla los sistemas de monitoreo y extracción de sustancias del relleno sanitario ni la excavación del volumen propuesto. Los costos alcanzados son válidos si se respeten las consideraciones hechas para evaluar el proyecto.

El documento se ha dividido en seis capítulos, la composición general de estos se muestra a continuación:

En el capítulo 1, se presenta el concepto del relleno sanitario y la forma en que se determinan las cantidades de residuos sólidos municipales en las ciudades, establece el área y el volumen requerido para la construcción del sitio de disposición final e indica los diferentes tipos de residuos que hasta ahora han sido depositados en los lugares utilizados como sitios de disposición.

En el segundo, se muestran los equipos necesarios para la construcción de los rellenos sanitarios: la maquinaria para movimiento de tierras, preparación y compactación de terraplenes y barreras impermeables, señalando las formas de obtener rendimientos, producción y costos horarios.

El tercer capítulo, presenta una comparación entre las leyes ambientales en lo relacionado a la construcción de rellenos sanitarios en los Estados Unidos de América y en la República Mexicana, la información se muestra en tablas que señalan las tendencias de cada país en este campo.

En el capítulo 4, se presenta información precisa sobre las características de las barreras impermeables naturales y artificiales; en las primeras se explica desde la estructura que se requiere que alcancen los suelos arcillosos, la capacidad de intercambio catiónico, el equipo de compactación a utilizar, el control y aseguramiento de la calidad y los diferentes problemas que presentan este tipo de estructuras. En la sección que corresponde a las capas impermeables artificiales, se analizan los tipos de geomembranas más utilizadas en los rellenos sanitarios, los espesores recomendados y la forma de determinarlos, los sistemas de enlace, el control y aseguramiento de la calidad, la interacción y problemas entre suelos y geosintéticos, el anclaje de las geomembranas, los posibles tipos de fallas y la estabilidad de taludes.

En el capítulo 5, se exponen tres tipos de sistemas para la cubierta y la base del relleno, construidos con diferentes materiales. La parte correspondiente a las capas para la base, presenta el análisis de dos sistemas convencionales y tres dobles, se aprecia la eficiencia alcanzada en estos tipos de sistemas según experimentación y muestreos en campo.

En el capítulo sexto, se resumen especificaciones técnicas para los materiales a utilizar en la construcción de las barreras impermeables, se indican las actividades y equipo necesario. En la parte final del trabajo, se presentan las posibles combinaciones entre los sistemas propuestos, además del costo directo por disposición.

---

## ANTECEDENTES

La contaminación ambiental producida por diferentes sustancias, tiene su inicio durante la revolución industrial. Posteriormente, el crecimiento de las ciudades y la generación de diferentes residuos incrementó el problema. Frecuentemente, los gobiernos asignaron la solución del problema al área de Salud Pública, así se tiene que a fines del siglo pasado los Estados Unidos establecieron los primeros lineamientos para lo que sesenta años después se conocería como la *Agencia de Protección al Ambiente de ese país (USEPA)*.

Los movimientos de grupos ciudadanos en favor del ambiente, influyeron notablemente en varios países (Inglaterra, Japón, Estados Unidos, Alemania, etc.). Después, la presión de la opinión pública sobre los gobiernos fue tal, que de esta forma se inició lo que en nuestros días se conoce como legislación ambiental.

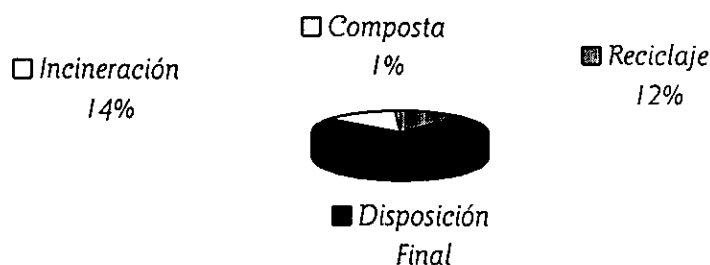
En los Estados Unidos la actividad en favor del ambiente se presentó a finales de la década de los sesenta. En 1989 la *Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA)*, presentó ante el Congreso de ese país un documento en el que se establecían las cantidades de residuos producidas de 1960 hasta 1985, se habían incrementado de 87 a 158 millones de toneladas anuales; el informe estimaba que aproximadamente el 15% de esos residuos eran de tipo peligroso; del total de los residuos dispuestos se determinó que el papel y cartón formaban el 41%, residuos diversos no peligrosos (incluyendo de jardinería) 18%, vidrio 9%, residuos de alimentos 8%, plásticos 7%, variedad de inorgánicos 2%.

El mismo año el Congreso inició una serie de investigaciones que impulsaron diversas propuestas para establecer programas de reciclaje, incineración y disposición. El objetivo, era recuperar la mayor cantidad posible de materiales y minimizar los residuos a disponer. Las investigaciones detectaron anomalías en relación a la disposición conjunta de residuos sólidos municipales y peligrosos, además de la ubicación de sitios de disposición en lugares inadecuados. Por esto, fueron aprobadas una serie de modificaciones en cuanto a los aspectos técnicos, económico y de responsabilidad de los constructores y operadores; además de establecerse un decreto de cierre con fecha límite el 9 de octubre de 1996 para los sitios que no cumplieran con las condiciones mínimas exigidas por la *Agencia de Protección al Ambiente*.

La meta principal del Congreso y la *Agencia* fue establecer programas para reciclar e incinerar la mayor cantidad de residuos con la intención de disminuirlos y depositar el menor volumen, alargando la vida útil de los más de tres mil quinientos rellenos que existen en ese país; retrasando la construcción de nuevos sitios y considerando la alternativa de reabrir lugares en los que se han estabilizado los residuos.

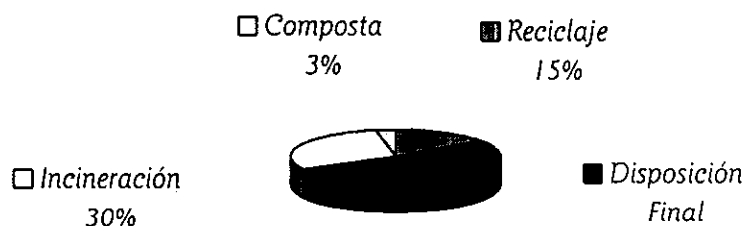
El informe mencionaba que sólo se recuperaba el 12% del total de los residuos, estimándose la posibilidad de recuperar por lo menos el 60%, concluyéndose que se estaban enterrando grandes cantidades de materiales que eran útiles al país. Se determinó que el 73% del total de los residuos se deposita en rellenos sanitarios, el 14% se incinera y el 1% se utiliza para composta. En 1996, la *Agencia de Protección al Ambiente* indicaba que la producción diaria por habitante se había incrementado de 1.5 a 2.0 kg y que las metas propuestas para 1995 en lo relacionado al aumento en el reciclaje, incineración y composta no se habían alcanzado.

Los datos sobre el manejo integral de los residuos sólidos municipales en los Estados Unidos se presentan en la *gráfica A.1*.



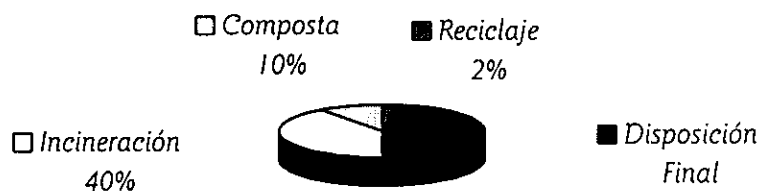
Gráfica A.1. Manejo integral de los residuos sólidos municipales en Estados Unidos.

En otros países la situación de los programas de aprovechamiento y disposición de los residuos sólidos municipales, se basan en la recuperación y disposición e intentan establecer un sistema equilibrado entre recuperación y disposición. Así, se tiene que, en Alemania el 52% se deposita en los rellenos sanitarios, el 30% se incinera, el 3% se utiliza para composta y el 15% es reciclado, en el esquema A.2 se aprecia la información anterior.



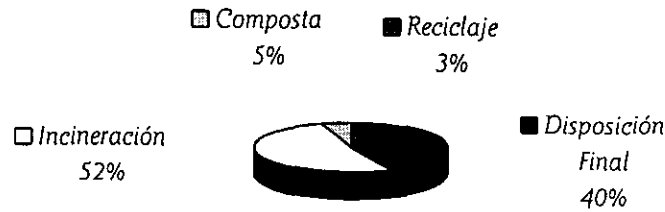
Gráfica A.2 Manejo integral de los residuos sólidos municipales en Alemania.

En Francia los porcentajes son los siguientes respetando el mismo orden: 48, 40, 10 y 2% y su representación se muestra en la gráfica A.3.



Gráfica A.3 Manejo integral de los residuos sólidos municipales en Francia.

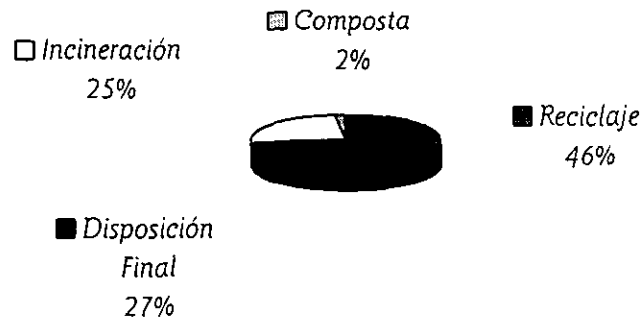
Suecia presenta 40, 52, 5 y 3% respectivamente (*esquema A.4*). Los altos valores presentes en la incineración se deben a que los residuos sólidos municipales se utilizan para producir energía.



Gráfica A.4 Manejo integral de los residuos sólidos municipales en Suecia.

El país que muestra mayores avances en relación al reciclaje es Japón con 27, 25, 2 y 46% (*gráfica A.5*). Esto por los programas de educación ambiental y al interés de la sociedad por evitar la contaminación de recursos (suelo y agua), que tienen un alto valor para su país.

Japón cuenta con estándares estrictos a nivel mundial en relación a la construcción de rellenos sanitarios. Sin embargo, el desarrollo de la tecnología para el control de la contaminación por residuos sólidos se ha enfocado al reciclaje e incineración, depositando en los rellenos sanitarios sólo los materiales que han sido reducidos a su mínima expresión y ya no son útiles.



Gráfica A.5 Manejo integral de los residuos sólidos municipales en Japón.

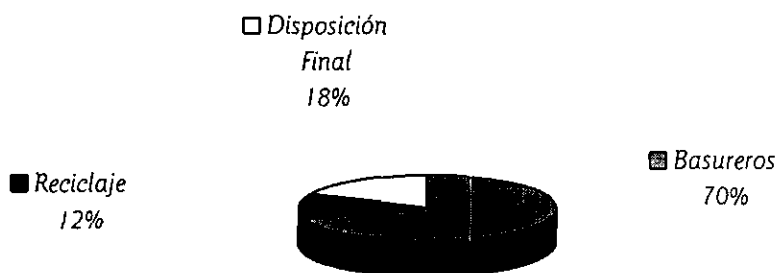
Las experiencias en el manejo integral de los residuos sólidos municipales señalan al relleno sanitario como parte fundamental en los sistemas para el control de la contaminación del suelo y agua. En los casos anteriores, esta obra de ingeniería se ha construido para garantizar la disposición segura de los residuos.

En México, el esfuerzo por el control de la contaminación data de principios de los setentas. Sin embargo, es hasta finales de los ochentas que se empieza a legislar para vigilar la contaminación ambiental. La legislación ambiental mexicana a través de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LQEEPA), contempla el manejo integral de los residuos lo cual está lejano a la realidad; La falta de especialistas y de recursos económicos en las área de disposición, reciclaje,

incineración y fabricación de composta, complican el logro de las metas establecidas. La parte relacionada a la disposición final de residuos sólidos municipales, implica elegir el lugar donde se construye el relleno y el uso de la tecnología que disminuya el riesgo de la contaminación del ambiente. El problema de la disposición es complejo, si se considera que, frecuentemente los residuos sólidos municipales, industriales y peligrosos se encuentran mezclados.

Según información proporcionada en 1998 por el *Instituto Nacional de Ecología (INE)*. En el país, se producen 88,700 toneladas de basura al día de las cuales el 18% se disponen en rellenos sanitarios tecnificados, el 70% se coloca en basureros o vertederos a cielo abierto, el 12% se recicla y no existe información en relación a incineración o fabricación de composta. El promedio de basura producida por habitante es de aproximadamente 0.904 kg/día. En el Distrito Federal, se producen 12,763 ton/día y en la zona conurbada se generan más de 21,000 ton/día. Considerando los cálculos anteriores, es posible decir que en el país se generan anualmente más de 32 millones de toneladas de residuos sólidos municipales.

La información anterior se puede apreciar con mayor claridad en la *gráfica A.6*.



*Gráfica A.6* Manejo de los residuos sólidos municipales en México.

Es importante señalar que en el país existen siete plantas de reciclaje y acopio que procesan 3431 toneladas de residuos al día. Se tienen ocho sitios (Guadalajara, Querétaro, Distrito Federal, Monterrey, Toluca, Tijuana, Atizapán de Zaragoza y Chihuahua) donde se manejan 13,580 ton de residuos sólidos municipales al día.

Por otra parte, aunque se estima más del 40% de los residuos son materia orgánica, aún no ha sido posible establecer programas para la obtención de composta.

## CAPÍTULO I

### EL RELLENO SANITARIO COMO SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL

1.1.	El Relleno Sanitario	9
1.2.	Los Residuos Sólidos Municipales	10
1.3.	La Producción de los Residuos Sólidos Municipales y la Determinación de la Superficie del Relleno Sanitario	11
1.4.	El Volumen Diario y Anual de los Residuos Sólidos Municipales a Disponer	12

## 1.1 El Relleno Sanitario

El relleno sanitario es la obra de ingeniería para la disposición final y segura de los residuos sólidos municipales. Debiéndose entender por la disposición final, la acción de depositar permanentemente los residuos en sitios y condiciones adecuadas para evitar daños al ambiente.

Este tipo de obra civil, se compone de un sistema de capas impermeables que se localizan en la parte inferior, seguido de los residuos que se disponen y diferentes capas de drenaje y de materiales de cubierta con baja permeabilidad. La función de las capas impermeables de la base es evitar el paso del lixiviado y biogás, que se generan durante el proceso de descomposición de los residuos, éstas pueden ser construidas con algún suelo de baja permeabilidad o con algunos tipos de membrana artificiales en forma de lienzos que tienen las características deseadas de impermeabilidad y de resistencia al ataque de las sustancias que se generan en el lugar. La parte correspondiente a la cubierta tiene como función disminuir la entrada de agua al sistema, evitando que se originen cantidades considerables de lixiviado. En el relleno también se utilizan filtros para la extracción de las sustancias líquidas y gaseosas en las partes superiores e inferiores del sistema es común.

En la figura 1.1 se observa el perfil convencional de un relleno sanitario. Es importante señalar que el contorno del sitio de disposición, varía dependiendo de las exigencias del proyecto.

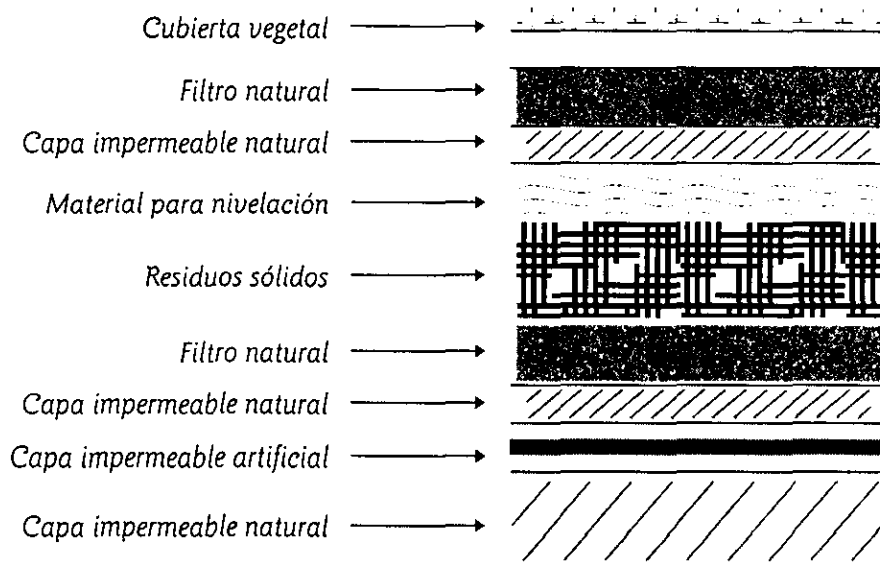


Figura 1.1 Perfil convencional del relleno sanitario

Generalmente, los residuos se producen en forma sólida, líquida, gaseosa o en mezclas de las anteriores. Dependiendo del tipo de materia prima con que se haya fabricado, se obtienen las características de degradabilidad del residuo.



## 1.2 Los Residuos Sólidos Municipales

Los residuos sólidos municipales son de origen residencial, comercial e industrial, al depositarlos es posible observar alimentos en descomposición, residuos de jardinería, productos de papel, plásticos, hules y textiles, metales, madera, vidrio, cenizas, diferentes sustancias inertes y algunos tipos de suelos. Según Tchobanoglous (1994), cada habitante de ciudades grandes produce 1.25 y 1.50 kg/día.

Estos residuos presentan una serie de propiedades físicas, químicas y biológicas. Dentro del primer grupo las más importantes son: el peso específico, el contenido de humedad, el tamaño y la distribución de partículas, la capacidad de campo de los residuos sólidos y la permeabilidad del residuo compactado; su conocimiento sirve para determinar el volumen de disposición, evaluar las condiciones para la adecuada degradación del residuo, recuperar materiales mediante medios mecánicos y magnéticos, establecer la humedad retenida del residuo, así como las características de los líquidos generados por la basura, el análisis y señalamiento del movimiento que tendrán éstos y los gases generados en el relleno sanitario.

Las propiedades químicas de los residuos establecen las cantidades de carbón, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre que los conforman. Por esto, es posible cuantificar el contenido de energía del residuo y las cantidades de biogás que se generarán.

Dentro de las propiedades biológicas de los residuos sólidos municipales las más útiles son la determinación de los constituyentes solubles al agua, la biodegradabilidad, la volatilidad, la producción de olores y la reproducción de vectores biológicos.

### Otros Tipos de Residuos Presentes en los Rellenos Sanitarios

Existen diferentes tipos de residuos que durante décadas han sido dispuestos en forma conjunta con los municipales; Oweis y Khera (1991) indican que en los ochenta el 70% de los residuos industriales generados en Estados Unidos se dispusieron en rellenos que carecían de algún tipo de capa impermeable en la base o del sistema de cubierta. El origen de los residuos se menciona a continuación.

- ◆ Industriales: proceden de las industrias química, alimentaria, petrolera, plástica y de resinas, pulpa y papel, maderas y farmacéutica.
  - ◆ Minerales: se obtienen al extraer metales, combustibles, fertilizantes, compuestos químicos y arcillas.
  - ◆ Industriales: conseguidos del hierro, del cemento y de las plantas de fundición y hornos eléctricos. Los contaminantes se presentan en forma de partículas, que al recolectarlas tienen forma de lodos y cenizas con altos contenidos de arsénico, selenio, mercurio y otros metales pesados peligrosos.
  - ◆ Materiales: producto de los sistemas de dragado (sedimentos naturales tales como rocas, gravas, arenas limos y arcillas) presentan contaminación por metales pesados y diferentes compuestos y los agrícolas formados por cantidades de fertilizantes y materia orgánica
  - ◆ Lodos: productos de los sistemas de alcantarillado contaminados con sustancias peligrosas vertidas en los sistemas de drenaje.
-

- ◆ Sustancias peligrosas. Colocadas en recipientes en los rellenos, el 90% se encuentran en estado líquido y frecuentemente no se les realiza exámenes de compatibilidad química, ni se tiene un control de la colocación de los residuos en el relleno.

### 1.3 La Producción de los Residuos Sólidos Municipales y la Determinación de la Superficie del Relleno Sanitario

La cantidad y tipo de residuos definen la vida útil del sitio de disposición. Por esto, es necesario determinar el número de habitantes a servir y establecer las cantidades de desechos sólidos a disponer.

#### Proyección de la Población

Existen diferentes formas para determinar el crecimiento de una población, el método geométrico es el más usado ya que semeja la expansión de las poblaciones biológicas que tienen una tasa de crecimiento constante. La siguiente expresión nos muestra su cálculo:

$$P_f = P_o(1 + r)^n$$

donde,

- $P_f$  = población futura
- $P_o$  = población actual
- $r$  = tasa de crecimiento
- $n$  =  $(t_f - t_o)$  intervalo en años

Es recomendable comparar los resultados obtenidos con otros métodos de cálculo y con las diferentes curvas de proyección de las poblaciones.

La *producción per cápita* ( $P_{PC}$ ) de desechos sólidos se puede estimar así:

$$P_{PC} = \frac{D_{SR} \text{ en una semana}}{P_{OB} \times 7 \times C_{OB}}$$

donde,

- $P_{PC}$  = producción por habitante por día ( kg / hab-día)
- $D_{SR}$  = cantidad de desechos sólidos recolectados en una semana (kg/sem)
- $P_{OB}$  = población área urbana(hab)
- 7 = días de la semana
- $C_{OB}$  = cobertura del servicio de aseo(%)

El conocimiento de la *producción de desechos sólidos* ( $D_{SP}$ ), permite obtener información para establecer las características de los equipos de recolección y la cantidad de personas que efectuarán el trabajo, las rutas de recolección y su frecuencia el tamaño del área para la disposición final, los costos del sistema y el establecimiento de la tarifa por el aseo. La producción se calcula de la siguiente forma:

$$D_{SP} = P_{OB} \times P_{PC}$$

donde,

$D_{SP}$  = cantidad de desechos sólidos producidos (kg/hab)

$P_{OB}$  = población área urbana (hab)

$P_{PC}$  = producción per cápita (kg/hab-día)

#### Proyección de la Producción Total de Residuos Sólidos Municipales

La *producción anual* de desechos sólidos se estima considerando las proyecciones poblacionales y producción por habitante aunque se recomienda incrementar esta última anualmente en 1% .

La *densidad de los residuos* se consigue en campo al compactarlos y es el punto más importante para obtener los parámetros de diseño ( celda diaria, mensual y anual), el volumen del relleno y la vida útil del sitio de disposición.

La Organización Panamericana de la Salud menciona que las densidades máximas alcanzadas en basura recién compactada en pequeñas ciudades varía entre 400 y 500 kg/m<sup>3</sup> y en grandes urbes 600 y 700 kg/m<sup>3</sup>; las observadas en residuos estabilizados oscila entre 500 y 600 kg/m<sup>3</sup> y 800-950 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. El aumento de la densidad puede conseguirse mediante el tránsito del vehículo recolector por encima de las celdas ya conformadas.

#### 1.4 Volumen Diario y Anual de los Residuos Sólidos Municipales a Disponer

Los requerimientos para la evaluar el espacio del relleno sanitario están en función de:

- ◆ la producción diaria de desechos sólidos si se espera tener una cobertura del 100% o, en su defecto, de la cantidad de desechos sólidos recolectados;
- ◆ la densidad de los desechos sólidos estabilizados en el relleno sanitario;
- ◆ la cantidad de material de cobertura (20-25%) del volumen estabilizado de desechos sólidos.

Con los dos primeros parámetros se tiene el *Volumen Diario* ( $V_{DIARIO}$ ) y *Anual* ( $V_{ANUAL}$ ) de *Desechos Sólidos* que se requieren disponer, es decir:

$$V_{DIARIO} = \frac{D_{SP}}{D_{RSM}}$$

donde,

$V_{DIARIO}$  = volumen de desechos sólidos a disponer en un día ( $m^3/día$ )

$V_{ANUAL}$  = volumen de desechos sólidos en un año ( $m^3 / año$ )

$D_{SP}$  = cantidad de desechos sólidos producidos ( $kg/hab-día$ )

365 = equivalente a un año (días)

$D_{RSM}$  = densidad de los desecho sólidos recién compactados y estabilizados.

Con lo anterior, se puede calcular el Volumen del Relleno Sanitario en el Año, afectando el valor anterior por el material de cobertura así:

$$V_{RS} = 365 \times V_{DIARIO} \times M_C$$

$$V_{RS} = V_{ANUAL} \times M_C$$

donde,

$V_{RS}$  = volumen del relleno sanitario anual ( $m^3/año$ )

$M_C$  = factor del material de cobertura (1.2-1.25)

Después de calculado el volumen, se estima el área requerida para la construcción del relleno sanitario, depende de la altura del relleno y puede estar influida por la topografía del lugar.

Al área requerida para la construcción del relleno sanitario ( $A_{RS}$ ), se le tienen que agregar espacios adicionales para obras complementarias. La ecuación que representa el área requerida es:

$$A_{RS} = \frac{V_{RS}}{H_{RS}}$$

donde,

$A_{RS}$  = área a rellenar ( $m^2$ )

$V_{RS}$  = volumen del relleno sanitario anual ( $m^3/año$ )

$H_{RS}$  = altura o profundidad media del relleno sanitario (m)

y el Área Total Requerida ( $A_{TR}$ ) es:

$$A_{TR} = F \times A_{RS}$$

donde,

$A_{TR}$  = área total requerida( $m^2$ )

$F$  = factor de aumento del área requerida para las vías de penetración, áreas de aislamiento, caseta de registro e instalaciones sanitarias y patio de maniobras, se incrementa un aumento del área del 20 y 30 %.

## **CAPÍTULO 2**

### **MAQUINARIA PARA RELLENOS SANITARIOS**

2.1. Equipos de Construcción	17
2.2. Productividad y Eficiencia del Equipo	17
2.3. Selección del Equipo	17
2.4. Equipos Utilizados en Movimientos de Tierras y Rellenos Sanitarios	18
2.5. Determinación del Costo Horario de Equipos	21

## 2.1. Equipos para Construcción

Los equipos que se usan en la construcción de los rellenos sanitarios son los mismos que se utilizan en los trabajos de movimiento de tierras, construcción de carreteras y barreras impermeables para presas. El tamaño del relleno y el tiempo para la construcción, determina el tipo de equipo y la compra o renta de estos.

Las máquinas más utilizadas son: excavadoras, camiones para el movimientos de tierra y desplazamiento de material, tractores; motoniveladoras y motoconformadoras para desgarrar terrenos y nivelar o mezclar materiales, taludadoras para construir pendientes mayores de 3:1, cargadores con escarificador para facilitar el enlace entre las capas de suelo y compactadores "pata de cabra", vibratorios y lisos, para garantizar la construcción de las barreras impermeables y las de protección.

## 2.2 Productividad y Eficiencia del Equipo

Day (1978), afirma que la productividad en un equipo es la expresión empleada para designar el rendimiento de este en una hora y está en función de las condiciones y dirección del trabajo, destreza del operador, coordinación de las fuerzas de construcción relacionadas con la actividad realizada. Así se tiene que, la productividad real (en equipos automatizados) y la eficiencia de trabajo se relacionan de la siguiente manera:

$$P_R = P_O \times F_C \times F_{DT}$$

en donde,

$P_R$  = producción real

$P_O$  = producción óptima

$F_C$  = factor de corrección (necesario por descanso del operador en lapso de tiempo establecido)

$F_{DT}$  = factor de dirección de trabajo (interrupciones que se presentan en el trabajo del equipo)

## 2.3 Selección del Equipo.

Los siguientes parámetros auxilian en la selección de la máquina: trabajo a ejecutar, especificaciones técnicas para determinar el uso de maquinaria intermedia, requerimientos energéticos del equipo, tiempo, frecuencia mínima para el desplazamiento, distancia a recorrer y funcionamiento en condiciones climáticas desfavorables.

El tiempo para realizar el trabajo, la sincronización de equipos, los costos por administración y la operación, afectan el precio del proyecto. Por lo anterior se requiere identificar la maquinaria relacionada y su productividad (se recomienda, utilizar listas de equipo y la actividades a realizar para indicar la programación a seguir).

Las características técnicas del equipo (tamaño, posición de controles y visibilidad) afectan la eficiencia del operador al realizar el trabajo.

## 2.4 Equipos Utilizados en Movimiento de Tierras y Rellenos Sanitarios

Para efectuar un trabajo de movimiento de tierras en el relleno sanitario, es indispensable conocer las características del suelo y la topografía del lugar, para la selección del equipo más adecuado.

Las propiedades del suelo permite pronosticar las dificultades que se tendrán que resolver durante la construcción de la obra, uno de los problemas más importantes consiste en el manejo de material por el aumento (al excavar y sacarse del banco) o contracción del volumen (al compactarse); el primer concepto, se expresa como un porcentaje de incremento sobre el volumen medido en banco; el material compactado acusa una disminución del volumen con respecto al banco, algunos datos sobre las variaciones de volúmenes de materiales se presentan en la tabla 2.1.

Material	Porcentaje de Abundamiento	Porcentaje de Contracción
Arena o grava limpias, secas	+12 a +14	-12
Arena o gravas limpias, mojadas	+12 a +16	-14
Limo y arena limosa	+15 a +20	-17
Tierra común	+25	-20
Arcilla densa	+13 a +40	-25

Tabla 2.1. Abundamiento y contracción de materiales

Fuente: Day, D. 1992. "Biblioteca del ingeniero civil". Noriega Limusa

Para determinar el volumen suelto de material en banco, el de préstamo a cargar o el requerido para construir un tamaño dado de terraplén, se utiliza la siguiente fórmula:

$$B_l = \frac{(F_w B_{TC})}{F_H}$$

donde,

- $B_l$  = volumen suelto a cargar y acarrear,
- $F_w$  = factor de abundamiento =  $(1 + (\% \text{ abundamiento}/100))$ ,
- $B_{TC}$  = volumen total del relleno compactado que se requiere,
- $F_H$  = factor de contracción o =  $(1 - (\% \text{ contracción}/100))$ .

El ciclo de trabajo planteado incide directamente en el rendimiento diario y los costos; la elección de un banco de materiales cercano al sitio de construcción disminuye los precios por concepto de transportación.

La disponibilidad de materiales afecta significativamente en la selección del sitio de disposición, la situación óptima es aquella en la que el material que se excava, se utiliza para la construcción de las barreras impermeables.

El ciclo de movimiento de tierras se compone de los siguientes pasos:

- a) Aflojamiento del material para transformarlo a un estado manejable.
- b) Excavación del material para iniciar movimiento desde el lugar de origen.
- c) Movimiento del material desde el lugar de origen hasta el de depósito.
- d) Vaciado del material en su lugar de depósito.
- e) Trabajar el material para llevarlo a la condición final que se especifica.

### Equipo para Rellenos Sanitarios

A continuación se presenta una descripción general de los equipos y la actividad que realizan:

#### Tractores

Son equipos pesados que tiene como principal función cortar, excavar terracerías, desgarrar material, empujar, jalar, acarrear y tender el material; las partes más importantes del tractor son *la hoja* que cuya función es cortar y romper el material, *los brazos* (de empuje e inclinación) regulan la inclinación, la longitud y el ángulo de la hoja; el *sistema de desplazamiento* que se divide en orugas o ruedas las primeras proporcionan estabilidad en suelos húmedos y pendientes pronunciadas, las últimas dan al equipo rapidez y peso para compactar.

En los rellenos sanitarios se emplean en el despalme del terreno, extensión y acomodo del material, movimiento y compactación de los residuos sólidos municipales.

#### Cargadores

Su principal actividad es excavar y cargar, su estructura es similar a la de los tractores, la diferencia radica en las características del motor, la transmisión y los componentes hidráulicos que permiten mayor velocidad y movilidad. La descarga de material se puede realizar de las siguientes maneras: frontal (desplazamientos cortos del cargador y en excavaciones a cielo abierto), lateral (desplazamientos mínimos del cargador y poco espacio de maniobras), trasera (sin desplazamiento del cargador).

Las condiciones climáticas y del terreno determinan el uso de orugas (en suelo con mala tracción, pendientes pronunciadas y cargas elevadas) que proporcionan estabilidad y rapidez de movimiento. Los de neumáticos se emplean en suelos con buena tracción, distancias largas, poco espacio de maniobra y en materiales de fácil remoción.

En los rellenos sanitarios este equipo puede ser muy útil debido a su versatilidad. El uso de aditamentos como los escarificadores, facilitan el enlace entre las barreras impermeables compactadas.

#### Excavadora

La función de ésta es extraer material, cargarlo y depositarlo; las partes que componen la excavadora son la plataforma (en donde se encuentran los mecanismos de transmisión y mando), el montaje de tránsito (dispositivo armado que integra el sistema de desplazamiento y sirve como un medio de



sustentación), el equipo frontal de la máquina (es una pluma con accesorios y herramientas) y el sistema de propulsión que puede ser de orugas o neumático.

El trabajo a realizar indica los aditamentos a utilizar. Así, para trabajos no especializados de excavación se selecciona la pala frontal, en pozos y zanjas la pala retroexcavadora. En excavaciones de trayectorias verticales, carga y descarga de materiales se recomienda una draga de cucharón de almeja o una draga de arrastre.

#### Motoconformadora y Motoescrepa

La actividad que realiza la motoconformadora es variada, frecuentemente se emplea para nivelar, remover, mezclar, uniformar y extender materiales, en los rellenos sanitarios se utiliza al extender las capas a compactar y en el afine de taludes (al adicionar aditamentos). Las motoescrepas, se utiliza para cargar, acarrear y vaciar material suelto a distancias mayores a 90 m, por lo que compiten en producción y costos en estas actividades con los tractores y motoconformadoras.

#### Equipo de Compactación

La consolidación de las capas de suelo se realiza por el equipo de compactación: Los factores que influyen para alcanzar las características de diseño en un suelo son: el tipo de rodillo, la energía de compactación, número de pasadas y cantidad de agua.

El uso de la arcilla en los rellenos tiene como intención aprovechar su baja permeabilidad, para lograr las características de impermeabilidad deseada se utiliza el rodillo apisonador o "pata de cabra", ya que el peso total de la máquina se transmite al suelo a través de los pisones que ejercen una presión elevada (medida de  $\text{kg}/\text{cm}^2$ ); las velocidades alcanzadas por los equipos propulsados son mayores a 35 km/h. Sin embargo, ésta se encuentra limitada por el tamaño del pisón. La ventaja de este tipo de compactación radica en la acción de los pisones que se ejerce de abajo hacia arriba dando una presión ascendente y lográndose el amasado de la arcilla; los pisones del cilindro empiezan por comprimir la capa que se encuentra a 20 o 25 cm por debajo de la superficie del suelo, la compresión opera hasta que se haya alcanzado una dureza suficiente para resistir la presión de los pisones, a partir de ese momento la compresión de las capas superiores se apoya sobre una capa sólida, eliminando las bolsas de aire y garantizando que las capas se ligen adecuadamente.

#### Rendimiento de los Equipos

El rendimiento de cada equipo se determina mediante:

- ◆ Observación directa. Es la medición física de los volúmenes de los materiales medidos por la máquina durante la unidad horaria de trabajo;
- ◆ Reglas y fórmulas. Aunque es un método teórico, los resultados que se obtienen son precisos, aquí se evalúan los factores que afectan el rendimiento;
- ◆ Uso de tablas proporcionadas por el fabricante. Se entregan gráficas con curvas de rendimiento, las cuales son afectadas por factores de corrección.

## 2.5 Determinación del Costo Horario del Equipo

Para analizar el costo horario del equipo se requiere conocer su costo, capacidad de trabajo, especificaciones de calidad y el tiempo en que realiza eficientemente el trabajo. Los conceptos anteriores se presentan en una hoja que recibe el nombre de "hoja de costo horario". La información se encuentra dividida en tres tipos de cargos: fijos, por consumo y operación.

El costo horario, se define como: "el costo por hora de una máquina" (De Alba y Mendoza, 1988), la composición de cada una de estas hojas incluye el análisis de todos los factores que en esta intervienen, los que se muestra en la *tabla 2.2*.

Tabla 2.2. Composición del Costo Horario.

CONCEPTO	PARTE QUE FORMA DEL CONCEPTO	FORMA DE DETERMINARLO
Cargos Fijos	Por depreciación: es el resultado de la disminución en el valor original de la maquinaria, como consecuencia de su uso durante el tiempo de vida económica.	$D = \frac{V_a \cdot V_r}{V_e}$ <p>en donde.</p> <p>D = depreciación por hora efectiva de trabajo.</p> <p>V<sub>a</sub> = valor inicial o de adquisición de la máquina nueva en el mercado nacional.</p> <p>V<sub>r</sub> = valor de rescate de la máquina.</p> <p>V<sub>e</sub> = vida económica de la máquina (en horas de trabajo).</p>
	Por inversión: es el resultado equivalente a los intereses del capital invertido en la máquina.	$I = \left( \frac{V_a + V_r}{2H_o} \right) \times i$ <p>en donde.</p> <p>I = cargo por inversión por hora efectiva de trabajo.</p> <p>V<sub>a</sub> = valor inicial de la máquina.</p> <p>V<sub>r</sub> = valor de rescate de la máquina.</p> <p>(V<sub>a</sub> + V<sub>r</sub>)/2 = valor medio de la máquina durante su vida económica.</p> <p>H<sub>o</sub> = número de horas efectivas que el equipo trabaja durante el año.</p> <p>i = tasa de interés anual en vigor, expresada en forma decimal.</p>

<p>Por seguros: es el que se necesita para cubrir los riesgos a que está sujeta la máquina durante su vida económica.</p>	$S = \left( \frac{V_a + V_r}{2H_a} \right) \times P$ <p>en donde,  <i>S</i> = cargo por seguros por hora efectiva de trabajo.  <i>V<sub>a</sub></i> = valor inicial de la máquina.  <i>V<sub>r</sub></i> = valor de rescate de la máquina.  <i>(V<sub>a</sub> + V<sub>r</sub>)/2</i> = valor medio de la máquina durante su vida económica.  <i>H<sub>a</sub></i> = número de horas efectivas que el equipo trabaja durante el año.  <i>P</i> = prima anual promedio del valor de la máquina (3-6%).</p>
<p>Por mantenimiento mayor y menor: se origina por las erogaciones necesarias para conservar la máquina en buenas condiciones.</p>	$T = Q \times D$ <p>en donde,  <i>T</i> = cargo por mantenimiento mayor y menor por hora efectiva de trabajo.  <i>Q</i> = coeficiente que incluye servicio mayor y menor calculado a base de experiencias estadísticas que dependen de las características del trabajo.  <i>D</i> = depreciación.</p>

<p>Cargos por Consumo</p>	<p>Por consumo: suministro de combustibles y lubricantes</p>	<p><math>E = c \times Pc</math>  en donde,  <i>E</i> = cargo por consumo de combustibles (por hora efectiva de trabajo).  <i>c</i> = representa la cantidad de combustibles necesaria (por hora efectiva de trabajo); se determina en función de la máquina y de un coeficiente determinado por la experiencia.  <i>Pc</i> = representa el precio del combustible.</p>
	<p>Por otras fuentes de energía: generalmente se considera la transformación de energía mecánica a eléctrica.</p>	<p><math>Ec = 0.635 \text{ HP} \times Pe</math>  en donde,  <i>Ec</i> = energía eléctrica consumida en KWH.  <i>HP</i> = potencia nominal del motor.  <i>Pe</i> = precio de KWH puesto en la máquina.</p>

	<p>Por lubricantes: gastos por consumo de aceites lubricantes y los cambios periódicos en el motor.</p>	$Al = (c + al) \times Pl$ <p>donde.  <i>Al</i> = cargo de consumo de lubricantes por hora efectiva de trabajo.  <i>al</i> = cantidad de aceite por hora efectiva de trabajo.  <i>c</i> = consumo entre cambio sucesivo de lubricantes.  <i>Pl</i> = precio de los aceites que consumen las máquinas.</p>
	<p>Por consumo de llantas: está en función de las condiciones en las que se encuentran los caminos en los que se desplaza.</p>	$N = \frac{Vn}{Hv}$ <p>donde,  <i>N</i> = cargo por consumo de llantas, por hora efectiva de trabajo.  <i>Vn</i> = valor de adquisición de las llantas nuevas con las características indicadas por el fabricante.  <i>Hv</i> = son las horas de vida económica de las llantas (consideración de estadísticas).</p>
	<p>Por consumo de piezas de desgaste rápido: se trata de las piezas sujetas a fuerzas abrasivas y otros tipos de esfuerzos.</p>	$Pe = \frac{Vp}{Hr}$ <p>donde,  <i>Pe</i> = costo por pieza de desgaste rápido, por hora de operación del equipo..  <i>Vp</i> = valor de adquisición de piezas especiales de desgaste rápido.  <i>Hr</i> = son las horas de vida económica de dichas piezas.</p>

Carga por Operación	Se deriva del pago al personal que se encarga de la operación de la máquina.	$Co = \frac{So}{H}$ <p>donde.</p> <p>Co = cargo por operación del equipo por hora efectiva de trabajo.</p> <p>So = salarios por turno del personal necesario para operar la máquina. Los salarios deberán comprender: salario base y real</p> <p>H = Representa las horas efectivas de trabajo que se consideren para la máquina, dentro del turno.</p>
HMD	Costo directo de la hora máquina.	Es la suma de los cargos anteriores.
Carga Unitario por Maquinaria	Se define como el cociente del costo directo por hora máquina entre el rendimiento horario de la misma.	$CM = \frac{HMD}{RM}$ <p>en donde,</p> <p>CM = cargo unitario por maquinaria.</p> <p>HMD = costo directo de hora - máquina.</p> <p>RM = rendimiento horario, expresado en la unidad de que se trate.</p>

### **CAPÍTULO 3**

#### **LA LEGISLACIÓN AMBIENTAL EN LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA Y EN LA REPÚBLICA MEXICANA**

3.1.	Legislación Ambiental en los Estados Unidos de América	29
3.1.1.	Leyes que Rigen el Cuidado del Ambiente	29
3.1.2.	Ley de Recuperación y Conservación de Recursos de 1976.	30
3.1.3.	Ley de Recuperación y Conservación de Recursos, Subtítulo D en lo referente a los Sitios de Disposición para Residuos No Peligrosos.	30
3.2.	Legislación Ambiental en la República Mexicana	39
3.2.1.	Ley que Rige el Cuidado del Ambiente.	39
3.2.2.	Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Relación a los Sitios de Disposición Final.	40
3.2.3.	Ley de Adquisiciones y Obras Públicas	41
3.2.4.	Normas Técnicas Ecológicas Sobre los Sitios de Disposición Final.	43



### 3.1. Legislación Ambiental de los Estados Unidos de América.

El primer antecedente de lo que serían las leyes ambientales surgió en 1899 cuando se realizó un programa de control de residuos por parte del Servicio de Salud Pública. Hacia 1965, se inicia la etapa más importante de la legislación ambiental americana, cuando se publicó la *Ley sobre Disposición de Residuos Sólidos* promulgada por el Congreso de ese país (Tchobanoglous et al, 1994 y EPA, 1996). La *Ley Sobre Política Ambiental de 1969* fue aprobada por el Congreso y firmada por el presidente el 1º de enero de 1970.

La *Ley Sobre Política Ambiental*, impulsó el desarrollo de una política ambiental y un concilio de calidad ambiental en la presidencia, estableció metas en investigación sobre la afectación del ambiente y la calidad de vida, este último concepto se eleva al rango de Ley mediante la Declaración Ambiental que se presentarán en una lista de impactos al medio, la manera de mitigarlos o evitarlos, propone la implementación de acciones que auxilien en la preservación y planificación de los recursos renovables y no renovables, otorgó al público el derecho a consultar la información antes de que se inicie cualquier proyecto. La Declaración Ambiental sería precedida por la Evaluación Ambiental y evaluada por una nueva institución llamada Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos" (Mackenthum, 1992).

#### 3.1.1. Leyes que Rigen el Cuidado del Ambiente en los Estados Unidos

A partir del surgimiento de la *Ley de Política Ambiental*, se desarrollaron gradualmente diferentes preceptos para la protección del ambiente los que se presentan cronológicamente.

La *Ley para el Aire Limpio* surgió en 1970, su propósito desde entonces ha sido establecer la protección a la calidad del aire a través de la regulación de emisiones de contaminantes.

En 1972 surgieron las leyes sobre *Insecticidas, Rodenticidas y Fungicidas* y la de *Protección a Mares, Recursos y Santuarios*; la primera tiene como objetivo establecer que todos los pesticidas que se empleen sean estudiados de forma general por la Agencia de Protección al Ambiente para determinar sus características y decidir si se restringe o no su uso; la segunda regula la descarga de materiales y diferentes tipos de sustancias en aguas oceánicas.

La *Ley Sobre Seguridad del Agua Potable* fue aprobada en 1974 (y ampliada en 1977), en ésta se estipulan los estándares y regulaciones que se aplican en los sistemas de agua potable.

En 1976 se aprobaron dos leyes: *La del Control de Sustancias Peligrosas* y la de *Recuperación y Conservación de Recursos*, esta última había sido tomada y reformada de la *Ley sobre Disposición de Residuos Sólidos de 1965*.

La *Ley Sobre el Control de Sustancias Peligrosas* indica la verificación de las sustancias químicas peligrosas (excluyendo pesticidas) y establece la obligación de las autoridades a solicitar a los industriales pruebas de toxicidad química y registros sobre el manejo, transportación y distribución de residuos. La *Ley Sobre la Recuperación y Conservación de los Recursos* estipula la regulación de los sistemas de generación, tratamiento, almacenamiento y disposición de residuos, además del reciclaje y financiamiento de estas tareas.

La *Ley Sobre Responsabilidad, Comprensión, Respuesta y Compensación Ambiental* entró en vigor en 1980 y establece un programa para atenuar los riesgos a la salud pública y al ambiente provocados por los sitios de disposición final de residuos sólidos municipales y peligrosos.

### 3.1.2. Ley de Recuperación y Conservación de Recursos de 1976

En lo referente a la *Ley sobre Conservación y Recuperación de Recursos*, el Congreso de los Estados Unidos generó grandes cantidad de información con respecto a los sitios de disposición y encontró que millones de toneladas de materiales que podían ser recuperadas son enterrados con diversas sustancias, contaminando superficies que tienen un alto valor nacional; estos vertederos a cielo abierto son especialmente dañinos para la salud pública además de dañar zonas de abastecimiento de agua. Considerando lo anterior, se estableció que los residuos generados serían reciclados, tratados, almacenados o dispuestos para minimizar daños al ambiente y a la salud humana.

### 3.1.3. Ley de Recuperación y Conservación de Recursos, Subtítulo D en lo referente a los Sitios de Disposición para Residuos No Peligrosos.

Esta ley se encuentra dividida en siete subtítulos (de la letra A hasta la G). El subtítulo D, se refiere a los Residuos Sólidos No Peligrosos y señala que la Agencia de Protección al Ambiente indicará los estándares técnicos aplicables al tratamiento, manejo, operación, almacenamiento y de ayudas (mediante manuales) para la disposición de residuos; por lo que los permisos para estas actividades estarán bajo constante revisión. La autorización para los programas de transportación exigen un documento que acredite el movimiento de los diferentes tipos de residuos.

Las más severas restricciones fueron dadas para el cierre de los Sitios de Disposición (a partir del 9 de octubre de 1996) en caso de no contar con adecuados sistemas de operación y control de sustancias peligrosas mediante listados que faciliten que sustancias han sido dispuestas y en que parte se localizan.

En el *Subtítulo D* se estipulan los lineamientos que según la Agencia de Protección al Ambiente deben cumplir los operadores de los sitios de disposición para residuos no peligrosos. Sin embargo, las Entidades Estatales y Reservas Indias (Tribus) tienen el poder de establecer requisitos más estrictos si lo consideran pertinente. También, existe la posibilidad de otorgar algún tipo de beneficio al operador si se considera oportuno. Las concesiones dadas se han de notificar a la Agencia, la cual vigila mediante empresas certificadas, el funcionamiento de los rellenos sanitarios.

La información que se presenta aparece en el *Volumen 40, Parte 258 (con fecha 9 Octubre de 1991, 56FR50978) del Código de Regulaciones Federales* de la Agencia de Protección al Ambiente y señala una serie de criterios que deben cumplir los sitios de disposición final que reciban diariamente más de 20 toneladas de residuos sólidos municipales (el lugar que no cumpla con los requisitos deberá cerrar antes del 9 de octubre de 1996), estos se dividen en:

- ◆ Localización
- ◆ Operación
- ◆ Diseño
- ◆ Monitoreo y acciones correctivas para aguas subterráneas
- ◆ Cuidados para la clausura y posclausura
- ◆ Seguro financiero

El desglose de los conceptos relacionados se presenta en la *tabla 3.1*.

Tabla 3.1. Criterios que deben cumplir los sitios de disposición final en lo Estados Unidos  
Fuente: Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos. 1997.

Criterios	Obligación	Comentarios y Consideraciones Técnicas
<u>Localización</u>	Demostrar que se conoce y ha cumplido con un registro para la disposición y con lo referente a áreas restringidas, que se menciona en los siguientes puntos:	Los Estados y Tribus con programas aprobados por la Agencia pueden evitar la clausura por más de dos años; demostrando que no existe otra alternativa disponible para el manejo o disposición de los residuos.
Aeropuertos	Demostrar que el relleno se encuentra localizado a más de 3000 m de un aeropuerto o cualquier pista de aterrizaje para aviones de turbina, en caso de aviones de hélice la distancia será de 1500 m evitando la presencia de aves que inicien algún accidente. En caso de que se planea la construcción de un relleno sanitario a menos 8000 m de algún aeropuerto. Es obligatorio, dar aviso a la Administración Federal de Aviación	Demostrar que no se crearán a vuelos de tipo comercial o militar.  Informar a la Administración Federal de Aviación en caso de una posible construcción.
Zonas Pantanosas y de Marismas	Se prohíbe la expansión de rellenos sanitarios en zonas pantanosas y la construcción de nuevos en éstas, para evitar la pérdida de las redes pantanosas, minimizando efectos e impactos adversos y realizar las compensaciones ambientales convenientes.	Evitar el violar las regulaciones de Toxicidad en Calidad del Agua y Efluentes, así como poner en peligro a especies amenazadas o endémicas en sus hábitats, tampoco está permitido violar la Ley de Protección de Santuarios Marinos y demostrar que la estructura no contribuirá en el deterioro ambiental de la zona.
Áreas de Fallas Geológicas	Se prohíben las extensiones laterales y la construcción de nuevos rellenos a distancias menores de 60m donde se encuentren fallas geológicas que hayan cambiado desde la última era glacial; para garantizar que el relleno conserve su integridad estructural.	Los Estados y Tribus tienen la posibilidad de permitir lo contrario si el operador comprueba que no existirá un daño estructural si se coloca en esa distancia.

Zonas de Impacto Sísmico	Si un relleno sanitario se localiza o se construirá en una zona sísmica, el operador está obligado a que los sistemas de capa, recolección de lixiviado y captación de agua superficial estén diseñados para resistir terremotos de gran magnitud.	Se establecen estas condiciones para que exista la certeza de que la estructura no presentará problemas de falla y no habrá pérdida de algún recurso natural.
Áreas Inestables	Demostrar que la estructura del relleno sanitario no se encontrará comprometida durante el surgimiento de eventos que ocasionen daños.	Se clasifican como eventos dañinos: inundaciones con acarreo importantes de escombros, formación rápida de grietas o fracturas del suelo causada por la rápida retira de agua subterránea, asentamientos en lechos rocosos por explosiones repentinas y la licuefacción del suelo después de un largo período de humedecimiento y secado.
Operación	Cumplir con los requerimientos para el manejo de los residuos en rellenos sanitarios, esto incluye una serie de procedimientos.	Los procedimientos para el funcionamiento del relleno son los siguientes: registro de entrada de residuos peligrosos, material de cobertura, control de vectores biológicos, el control de gases explosivos, etc.
Regular las Recepciones de Residuos Peligrosos	Instalar un programa para detectar y prevenir la disposición de residuos peligrosos o regularán su entrada.	Los programas incluyen la inspección aleatoria, registro, adiestramiento del personal para distinguir los residuos y la notificación a las autoridades correspondientes en caso del descubrimiento de residuos peligrosos.
Material de Cubierta	Cubrir con al menos una capa de tierra de 1.5m de espesor los residuos sólidos al terminar el día de operación, para el control de vectores biológicos, fuego, transportación de la basura por el viento.	El Estado o Tribu está en el derecho de permitir el uso de algún material diferente para cubierta o renunciar temporalmente a la colocación de este tipo de material si por las condiciones climáticas lo permiten.

Vectores Biológicos	El dueño u operador es responsable de vectores biológicos como son roedores, mosquitos u otros animales o insectos que transmitan enfermedades.	La principal función de la cubierta es el evitar que los residuos estén en contacto con el ambiente, con lo que se evita el desarrollo de vectores biológicos, también disminuye el impacto visual que producen los residuos.
Gases Explosivos	Instalar un programa de revisión de emisiones de gas metano al menos cada tres meses. Si se exceden los límites permisibles, el operador debe inmediatamente avisar a las autoridades correspondientes. Desarrollar e implementar un plan de remediación en los 60 días siguientes al surgimiento del problema.	Establecer las medidas adecuadas para proteger la salud humana y el ambiente. Los Estados y Tribus tienen jurisdicción para modificar el tiempo de implementación de los planes.
Calidad del Aire	No se permite la quema de basuras, por parte de los responsables, a menos que se trate de residuos agrícolas, de silvicultura, de maleza, árboles enfermos y residuos de cirugías.	Cumplir con los requerimientos de la implementación de planes estatales por los estándares de calidad del aire.
Accesos a los Sitios de Disposición	Controlar el acceso para prevenir la descarga ilegal y la entrada de público.	Establecer barreras para controlar los accesos.
Diseño contra Tormentas	Construir, manejar y mantener dos tipos de sistema de control para manejar las corrientes y prevenir las inundaciones del relleno, considerar donde se descargarán los volúmenes de agua captados, y evaluar los criterios para descargar en cuerpos receptores.	Construir dos sistema de drenaje para evitar que los lixiviados superen la barrera impermeable; el diseño corresponderá a la peor tormenta en 25 años. El sistema externo servirá para colector y controlar el agua de lluvia, resultado del volumen captado en 24 horas de la peor tormenta de diseño citada.
Protección contra Aguas Superficiales	Los rellenos sanitarios serán operados de tal forma que los lixiviados extraídos no sobrepasen ningún aspecto la Ley de Aguas Limpias, en caso de no cumplir este punto el lixiviado se enviará algún tipo de planta de tratamiento que disminuya su toxicidad.	Cualquier violación a la Ley de Aguas Limpias, implica la reparación del daño por parte del operador.

<p>Control de Líquidos</p>	<p>En los rellenos no se aceptan sustancias residuales que se encuentren envasadas a menos que se trate de residuos que provengan de fosas sépticas, y que la celda tenga sistemas de captación y recirculación de lixiviados, de gas y de geomembranas que cumplan las características indicadas en el Diseño.</p>	<p>Se pretende minimizar el riesgo de contaminación por sustancias biológicas que pueden ser foco de infección y en caso de filtración a mantos acuíferos o cuerpos receptores ocasionar problemas de salud pública. Los envases o contenedores que se reciban en los rellenos deben contar con las siguientes características: tamaño máximo del recipiente de 200 litros designado para almacenar sustancias caseras.</p>
<p>Registros y Manejos</p>	<p>Los operadores tendrán a disposición una serie de documentos para ser consultados por cualquier entidad oficial, estos son: localizar lugares restringidos, informes para la exclusión de residuos peligrosos, resultados del monitoreo de gases, información que demuestre el diseño de los sistemas de lixiviados y gases, registros del monitoreo de las aguas subterráneas, acciones correctivas para mantos acuíferos, planes de clausura y posclausura, seguro financiero y estimación de los costos por alguno de los problemas anteriores.</p>	<p>El registro y colocación de los diferentes tipos de residuos ayudan a establecer el mapa de residuos, en caso de contaminación se tiene seguridad en localizar la zona de falla y saber que no se han captado residuos peligrosos, además del apoyo financiero para cualquier requerimiento.</p>
<p><u>Diseño</u></p>	<p>El criterio de diseño establece dos alternativas para la expansión o la construcción de nuevas unidades. Las alternativas consisten en el diseño desarrollados por las Tribus o Estados y la propuesta por la Agencia de Protección al Ambiente.</p>	<p>El establecimiento de los criterios de diseño puede ser flexible y está en función de factores como: el clima, la geología, la hidrología, la facilidad para conseguir el material para la cubierta y la naturaleza y cantidad del lixiviado.</p>

<p>Diseño Desarrollado en Áreas de Tribus y Estados</p>	<p>Alternativa 1: presenta un programa desarrollado por el operador de acuerdo con el director o representante de la Entidad (el cual tiene la obligación de conocer los estándares de diseño de la Agencia).</p>	<p>Existen condiciones ambientales que influyen en el posible diseño como ya se señaló. La Tribu o Estado establecerá en su opinión cual es la alternativa conveniente y se someterá a los sistemas de revisión de la Agencia.</p>
<p>Diseño Desarrollado por la Agencia de Protección al Ambiente (debe ser usado por todas las Tribus y Estados donde la Agencia tiene Jurisdicción)</p>	<p>Alternativa 2: aprobar el diseño propuesto por la Agencia que consiste en dos sistemas el inferior formado por dos capas impermeables y el superior por una estructura de captación de lixiviados. El sistema de capas impermeables consiste de una membrana sintética flexible (geomembrana) colocado en la parte exterior y una capa de suelo de 60 cm de espesor con una conductividad hidráulica no mayor a <math>1 \times 10^{-7}</math> cm/s, puesta en la parte inferior. El sistema de captación debe diseñarse para que conserve un tirante no mayor a 30cm.</p>	<p>Este tipo de diseño se considera de alta seguridad, sin embargo es regiones donde las condiciones climáticas, hidrológicas, geohidrológicas y de suelos son adversos, se pueden establecer criterios más estrictos para el diseño. En estos casos la Tribu o Estado determinarán que alternativa es en su opinión la más adecuada y se enviará a la Agencia que dará un dictamen en los 30 días siguientes. Los sistemas de cubierta serán aprobados por la Agencia según sean las condiciones climáticas de cada región.</p>
<p>Monitores y Acciones Correctivas en Aguas Subterráneas</p>	<p>Garantizar los criterios para los tipos de monitoreo en las aguas subterráneas, los programas de muestreo y análisis, y las acciones correctivas para asegurar la protección de la salud humana y del ambiente. En este caso rige el criterio federal, pero los Estados y las Tribus pueden aprobar leyes más estrictas y exigir que los operadores trabajen en forma conjunta con las tribus o estados.</p>	<p>Establece un continuo muestreo para evitar contaminación de acuíferos o la pérdida de otro recurso natural.</p>

<p>Sistema de Monitoreo de Aguas Subterráneas</p>	<p>Instalar un sistema de monitoreo que conecte todas las celdas del relleno sanitario. En lugares estratégicos del acuífero principal se obtendrán muestras y en algunos puntos bajos antes de llegar a los límites de la estructura que sean considerados como relevantes evaluando las características de los sitios.</p>	<p>El establecimiento del sistema debe ser aprobado y certificado por un reconocido experto o por un director de las Tribus o Estados reconocido por la Agencia. El sistema de monitoreo podrá tener variaciones si el operador del sitio de disposición puede demostrar que el relleno se encuentra localizado sobre una estructura geológica que evitará la migración de contaminantes durante la vida útil incluyendo el período de clausura y posclausura.</p>
<p>Programas de Monitores para la Detección y Estimación de Sustancias</p>	<p>Los Estados y Tribus tienen programas flexibles autorizados por la Agencia, que se adaptan a los requerimientos de las regiones; los que no cuentan con ese tipo de programas deben cumplir con el reglamento para detección y estimación de los sistemas de monitoreo.</p> <p>El reglamento establece la análisis periódica de muestras (al menos dos al año) para determinar los constituyentes presentes en el agua.</p>	<p>Si es detectada la contaminación del acuífero el operador esta en el derecho de demostrar, que se cometió un error en el muestreo, que existe una variación natural en la calidad del agua o que los contaminantes son producidos por otras fuentes.</p> <p>Se notificará al Estado o Tribu y a la Agencia para iniciar un riguroso plan de períodos cortos de monitoreo para establecer la extensión y gravedad de la contaminación así como los contaminantes más importantes y se iniciarán los trabajos de limpieza del acuífero considerando niveles que no excederán los límites máximos establecidos para la calidad del agua subterránea empleada para consumo humano.</p>
<p>Programa de Acciones Correctivas</p>	<p>El operador establecerá los manejos correctivos apropiados. Durante la acción correctiva el responsable debe continuar con el monitoreo en acuerdo con el programa acordado. Mientras se evalúan los posibles técnicas de remediación el operador debe tener reuniones públicas para informar y discutir el problema. Una vez que la técnica ha sido seleccionada el dueño u operador llevará la responsabilidad de la eficiencia del sistema.</p>	<p>Se tiene principal énfasis en el derecho a la información para el ciudadano. Al desarrollarse la técnica de remediación, se establecerá una de muestreo para determinar si el trabajo de limpieza es eficiente. En caso de ser así, la acción debe continuar hasta que se llegue a cumplir la acción correctiva, el trabajo seguirá por al menos tres años, aunque el director de la Tribu o Estado puede establecer períodos de tiempo diferentes.</p>



<p>Cuidados en la Clausura y Posclausura</p>	<p>Este criterio establece los estándares específicos que los operadores deben cumplir cuando se cierre el relleno, instalándose un programa de mantenimiento y monitoreo constante durante el periodo de la posclausura</p>	<p>Al iniciar ésta etapa, el responsable registrará la fecha de inicio, informar a las autoridades y tener en regla los documentos de aprobación del sitio. Cuando esté por terminar la vida útil del relleno, es necesario contar con los planes de clausura y posclausura, permisos de operación del relleno, registros de los tipos de residuos recibidos, además de agregar material de cubierta final o colocar algún tipo de capa artificial impermeable antes de que se cumpla el lapso de tiempo para realizar ésta actividad.</p>
<p>Sistemas de Cobertura</p>	<p>Los sistemas de cubierta final serán diseñados de tal forma que tengan una permeabilidad menor o igual a la capa impermeable localizada en la parte baja del relleno o en su caso que no exceda <math>1 \times 10^{-5}</math> cm/s. El representante del Estado o Tribu puede aprobar alguna tecnología alternativa que cumpla con la reducción de la infiltración y la disminución de la erosión.</p>	<p>El tipo de suelo tendrá un espesor de 45 cm para prevenir la entrada de agua y algún material de cubierta de 15 cm que evite la erosión y desintegración del suelo de cubierta y que pueda favorecer el crecimiento de plantas. Cuando se utilice membrana sintética flexible, ésta cumplirá con la impermeabilidad requerida para los sistemas de cobertura.</p>
<p>Responsabilidad por Mantenimiento</p>	<p>El operador o dueño del relleno tiene la responsabilidad por 30 años después de la clausura de mantener la integridad de la cobertura final, el monitoreo de aguas subterráneas y gas metano, además del manejo del lixiviado.</p>	<p>Se obliga a la contratación de un seguro financiero para que en caso de ser necesario, existan recursos económicos para resolver el surgimiento de cualquier problema.</p>

<p>Seguro Financiero</p>	<p>Es obligatorio para los particulares que a partir del 9 de abril de 1994 cumplan con un seguro financiero además de demostrar responsabilidad financiera por los costos de clausura, así como los cuidados de la posesión y por las acciones correctivas que en un cualquier momento tendrían que realizar.</p>	<p>Los requerimientos pueden ser cumplidos mediante: un fondo de crédito, fianza de garantía, carta de crédito, seguro y garantizar junto con un fiador del estado de responsabilidad o establecer un sistema mecanismos múltiples (consiste en una combinación de los anteriores).</p> <p>Los Estados y Tribus están en la posibilidad de proponer y aprobar otros mecanismos de aseguramiento.</p>
<p>Mecanismos Financieros Adicionales</p>	<p>Los operadores están en la posibilidad de usar diferentes sistemas para satisfacer los requerimientos del seguro financiero en caso de requerirse la reparación de cualquier daño o para el período de mantenimiento después de la posesión.</p>	<p>Los siguientes son requerimientos para los operadores: contar con un seguro, una garantía y un fiador con las características que exige la Agencia.</p>

### 3.2. Legislación Ambiental en la República Mexicana.

El primer intento por establecer una dependencia gubernamental encargada de la protección al ambiente tuvo lugar en 1972, cuando se crea la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente; posteriormente en 1977 aparece la Dirección General para Mejoramiento del Ambiente como parte de la anterior. Ésta auxiliaba en asuntos técnicos relativos a programas de saneamiento y mejoramiento ambiental, otras de sus funciones eran: proponer planes, y normas técnicas ambientales, coordinar actividades técnicas de mejoramiento del ambiente, realizar estudios y acciones conjuntas para dictaminar sobre problemas del ambiente, resolver sobre propuestas y dispositivos, equipos y sistemas que se sometían a la consideración de la Subsecretaría, para su posible aplicación en el problema de la contaminación ambiental, planear y organizar los cursos de capacitación y adiestramiento del personal en materia de saneamiento y mejoramiento ambiental.

Otras áreas relacionadas con el saneamiento y el ambiente eran las de: efectos del ambiente en la salud, programas especiales de saneamiento, saneamiento atmosférico, promoción de saneamiento ambiental, inspección sanitaria y la comisión constructora de ingeniería sanitaria, cada una con sus funciones específicas.

En 1982 se crea la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), ésta delegó en 1985 las facultades para prevenir y controlar la contaminación a las Entidades Estatales, las cuales reciben asesoramiento para realizar eficientemente el trabajo; siete años después la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología se transformaría en el Instituto Nacional de Ecología (INE) el que pasaría de la Secretaría de Desarrollo Social a la Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP).

#### 3.2.1. Ley que Rige el Cuidado del Ambiente

La *Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LQEEPA)* es reglamentaria en las disposiciones que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente; indica la relación existente entre la federación, entidades federativas y municipios en materia ambiental, señala las atribuciones de la Secretaría, la coordinación entre dependencias y entidades de la administración pública federal, establece la política ecológica a seguir, los sistemas de prevención y control de los diferentes tipos de contaminación, determina la participación de la sociedad y determina los diferentes tipos de sanciones por faltar a las normas ambientales.

La publicación detallada de las nuevas normas técnicas, así como las modificaciones de las ya existentes en materia ambiental son presentadas en el Diario Oficial de la Federación, a través de la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP).

Antes de seleccionar el lugar donde se instalará el relleno sanitario, es necesario cumplir con los lineamientos establecidos por diferentes instituciones, así como la entrega de una serie de estudios que exige la *Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LQEEPA)* y la *Ley de Adquisiciones y Obras Públicas (LAOP)*.

### 3.2.2. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente en Relación a los Sitios de Disposición Final:

La *Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente* se encuentra dividida en seis títulos y 194 artículos, mostrando en algunos información en relación a los sitios de disposición. A continuación se indican los que presentan información de interés:

#### *Artículos del 6 al 9.*

Se especifica el manejo y disposición final de los residuos sólidos municipales, la actividad debe realizarla las entidades federativas y municipios; en el Distrito Federal esta actividad deberá ser realizada por el Departamento del Distrito Federal. Por otra parte, *la Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) es la responsable de expedir las normas técnicas* para la recolección, tratamiento y disposición de toda clase de residuos, en coordinación con la Secretaría de Salud.

#### *Artículo 19.*

Señala la importancia del *Ordenamiento Ecológico* al que se le define como: "el proceso de planeación dirigido a evaluar y programar el uso del suelo y el manejo de los recursos naturales en el territorio nacional con el fin de preservar y restaurar el equilibrio ecológico y la protección al ambiente", por lo que es necesario revisar diversas características de interés en el lugar, antes de ser propuesto como posible sitio de disposición final.

#### *Artículo 36.*

Define a las *Normas Técnicas Ecológicas (NTE)* como: "el conjunto de reglas científicas o tecnológicas emitidas por la Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca, que establezcan los requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, parámetros y límites permisibles que deberán de observarse en el desarrollo de actividades o uso y destino de bienes, que causen o puedan causar desequilibrio ecológico o daño al ambiente, y además que uniformen principios, criterios, políticas y estrategias en la materia. Las normas técnicas ecológicas, determinarán los parámetros dentro de los cuales se garanticen las condiciones necesarias para el bienestar de la población y para asegurar la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente".

#### *Artículos del 134 al 136.*

En estos se mencionan de manera general una serie de criterios para la prevención y control de la contaminación del suelo y propone varias alternativas como son: la ordenación del desarrollo urbano, el reuso y reciclaje de materiales, operación de los sistemas de limpieza y disposición final, control mediante autorizaciones para instalación y operación de los sitios de disposición final.

#### *Artículos del 137 a 142.*

Proponen el establecimiento de programas de implementación, mejoramiento, recolección, inventarios de fuentes generadoras, almacenamiento, transporte, alojamiento, reuso, tratamiento y disposición final, lo anterior depende de la autorización de los gobiernos estatales y municipales cuyo soporte serán las normas técnicas ecológicas, la Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca promoverá la celebración de acuerdos para la coordinación y asesoría en las áreas mencionadas. En caso de que se presenten residuos industriales de lenta degradación, será posible su disposición siempre y cuando se respete el reglamento correspondiente, y por último queda prohibida la importación de residuos sólidos y peligrosos en el territorio nacional.

El 13 de diciembre de 1996, se realizaron diversas reformas, adiciones y derogaciones a esta Ley. Los artículos que influyen directamente en los rellenos sanitarios son: 37, 139, 143, 144 y 151, en estos se menciona el uso de las tecnologías alternativas para la solución de problemas ambientales, se especifica que la infiltración de sustancias contaminantes quede regulada por la Ley de Aguas Nacionales. Se obliga a la disposición final de los plaguicidas, fertilizantes y otros materiales peligrosos según indique la Secretaría de Agricultura, se prohíbe la importación de los materiales citados cuando en el país de origen este prohibido y se priva de la posibilidad de confinar residuos peligrosos en estado líquido.

### 3.2.3. Ley de Adquisiciones y Obras Públicas (LAOP).

La *Ley de Adquisiciones y Obras Públicas (LAOP)* señala en sus artículos 19 y 20, los requerimientos que todo proyecto de obra civil debe cumplir para que sea aprobada su construcción.

Se establece que previamente a la realización de la obra pública las dependencias y entidades, deberán tramitar y obtener de las autoridades competentes los dictámenes, permisos, licencias y demás autorizaciones que se requieran para su realización.

Las autoridades competentes deberán otorgar a las dependencias y entidades que realicen obras públicas las facilidades necesarias para su ejecución

El artículo 19, señala que al elaborar los programas de obra pública se considere la factibilidad técnica, económica y ecológica de la obra, así como las características ambientales, climáticas y geográficas de la región.

El artículo 20 señala textualmente: "Las dependencias y entidades estarán obligadas a prever los efectos sobre el medio ambiente que pueda causar la ejecución de la obra pública, con sustentos en los estudios de impacto ambiental previstos en la *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LQEEPA)*. Los proyectos deberán incluir las obras necesarias para que se preserven o restauren las condiciones ambientales cuando estas pudieren deteriorarse, y se dará la intervención que corresponda a la Secretaría de Desarrollo Social y, en su caso, a las dependencias y entidades que tengan atribuciones en la materia."

Al analizar lo que dictamina en la *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente* y la *Ley de Adquisiciones y Obras Públicas*, es posible, establecer que la selección del sitio de disposición dependerá principalmente de tres factores:

- ◆ El ordenamiento ecológico.
- ◆ La evaluación del impacto ambiental.
- ◆ El cumplimiento de las normas técnicas ecológicas.

#### *Ordenamiento Ecológico*

Las partes más importantes de este concepto, se refieren a la planificación del uso del suelo y del manejo de los recursos naturales. Al considerar estos puntos se deduce que es necesario tener la clasificación detallada del uso del suelo en todas las regiones del país, para identificar los lugares que tienen las características deseadas.

Por otra parte, el manejo de los recursos naturales está relacionado con la necesidad de restaurar y preservar el equilibrio ecológico por lo que conviene analizar características de los ecosistemas de la región, vocación de la región en cuanto a sus recursos naturales, desequilibrio existente en los

ecosistemas, equilibrio actual entre los asentamientos humanos y las condiciones del lugar, actividades económicas y distribución de la población e impacto por nuevos asentamientos, obras o actividades.

### *Evaluación del Impacto Ambiental*

Para evaluar correctamente el impacto ambiental producido por el relleno sanitario es necesario formar un equipo multidisciplinario de especialistas que conozcan las diferentes actividades a realizar y el efecto que se producirá en el entorno, los puntos más importantes a considerar son: las distancias de áreas naturales protegidas y especies endémicas de la región, la zona de afectación, determinar la hidrología del lugar, los escurrimientos y la posible contaminación de acuíferos, indicar si se requieren obras complementarias, señalar oportunamente las medidas que se necesitan para amortiguar o compensar el impacto producido por la obra.

### *Normas Técnicas Ecológicas (NTE)*

Se presentan a través del Diario Oficial de la Federación y de las Gacetas Ecológicas que publica la Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP).

La norma técnica ecológica que establece la impermeabilidad requerida para la barrera impermeable es la NOM-084-ECOL-1994 publicada el 22 de junio de 1994, en esta se establecen una serie de condiciones técnicas y reglamentos para el sitio, las partes que se relacionan a la ubicación y las características de tipo topográfico y geotécnico ( coeficiente de permeabilidad  $k \leq 1 \times 10^{-5}$  cm/s y capacidad de intercambio catiónico o CIC  $\geq 30$  meq/100 g de suelo), se establece la necesidad de cumplir con distancias mínimas a los cuerpos receptores de aguas superficiales y subterráneas, aeropuertos, carreteras y centros urbanos, además de evitar la colocación del relleno en suelo que estén fracturados.

Las normas NOM-083-ECOL-1994 y NOM-083-ECOL-1996 detallan los valores de permeabilidad deseada ( $f < 3 \times 10^{-10}$  seg<sup>-1</sup>) considerando las características atenuantes del suelo localizado bajo el relleno.

Una vez observados los requerimientos que corresponden a la legislación nacional, es importante considerar que la dificultad principal consiste en equilibrar los factores señalados con los de tipo político, social y económico.

Las Técnicas para Seleccionar el Sitio de Disposición para los Rellenos Sanitarios.

Algunos autores como Bagchi (1990), Khera (1990) y McBean (1995), coinciden en la necesidad de utilizar listas en las que se comparen los distintos sitios propuestos para el fin que se busca. Los conceptos que es necesario clasificar y comparar para cada lugar son los siguientes:

- ◆ Geología del lugar.
- ◆ Topografía.
- ◆ Geotecnia.
- ◆ Geohidrología e hidrología.
- ◆ Usos del agua y suelo de la zona.
- ◆ Transportación al lugar y distancias a recorrer.
- ◆ Sitios que son susceptibles a inundación.
- ◆ Riesgo ambiental.

La otra parte que se necesita analizar, es la que corresponde al análisis de las condiciones políticas, sociales y económicas de la zona, algunas de las más importantes se mencionan a continuación:

- ◆ Arqueología e historia del lugar.
- ◆ Actividades económicas de la región.
- ◆ Futuro desarrollo económico de la zona.
- ◆ Utilidad actual del sitio.
- ◆ Cambios de estética y paisaje.
- ◆ Costo del lugar.
- ◆ Costos de inversión, construcción, operación, mantenimiento, clausura y posclausura.
- ◆ Impacto social.

Si se da un peso específico a cada uno de los puntos anteriores, es posible evaluar en una matriz distintos sitios propuestos. En el Distrito Federal, el Departamento de la ciudad, elaboró un método en el cual se relacionan diferentes características del lugar mediante un sistema de programación lineal, desarrollado gracias a la información estadística acumulada en varios años. El sistema consiste en relacionar los tres conceptos que definen a continuación:

#### *Elementos del Entorno*

Está constituido por los siguientes parámetros: aguas superficiales y subterráneas, aire, suelo, bienestar y salud.

#### *Características de los Suelos*

Se forma por los siguientes conceptos: geología, hidrogeología y geohidrología, climatología, vientos, características de los suelos, afectación al paisaje y a la estética entre otros.

#### *Factores de Campo*

Evalúa los requerimientos constructivos y ambientales en: los materiales para la cobertura, el acondicionamiento del sitio, la cercanía a zonas urbanas, la visibilidad del sitio, la incidencia del viento, la permeabilidad, la capacidad de intercambio catiónico, la ubicación del sitio dentro de la cuenca de aporte, la ubicación de pozos de abastecimiento de agua, etc.

Los conceptos anteriores interactúan y se pueden representar mediante sistemas de ecuaciones; entonces, es posible proponer un sistema que represente a los probables sitios de disposición. Así, al solucionar el sistema mediante el método simplex, se consigue la mejor alternativa para la disposición, el proceso a detalle puede ser consultado en el artículo " Metodología para el Emplazamiento de los Rellenos Sanitarios", (Sánchez Gómez, J., 1994) Publicado por la Asociación Mexicana para el Control de Residuos Sólidos y Peligrosos, A.C. (AMCRESPEC).

### 3.2.4. Normas Técnicas Ecológicas Sobre los Sitios de Disposición Final.

El desarrollo de las normas oficiales mexicanas en lo referente a los sitios de disposición, se presentan en los Diarios Oficiales de la Federación el 22 de junio de 1994 y del 25 de noviembre de 1996. En estos se establecen las condiciones que deben reunir los sitios destinados para la disposición final de los residuos sólidos municipales (ver *tabla 3.2*).

Tabla 3.2. Lineamientos para los sitios de disposición en la República Mexicana.

Fuentes: Diario Oficial de la Federación del 22 de junio de 1994 y del 25 de noviembre de 1996.

CRITERIO	OBLIGACIÓN	COMENTARIOS Y CONSIDERACIONES TÉCNICAS
Protección de Recursos		
Profundidad del Manto Freático	<p>El relleno sanitario deberá estar ubicado por encima del manto freático a por lo menos 10m. se requiere realizar estudios geofísicos y geohidrológicos.</p> <p>La autoridad competente podrá aprobar diferentes tecnologías que garanticen la equivalencia del requisito previsto.</p>	<p>Realización de estudios geofísicos para determinar las características del lugar donde se extenderá el sitio. El número de pruebas a realizar son en un sitio de 1 a 4 hectáreas se efectúan 3 sondeos eléctricos verticales; de 4 a 9 pruebas si son 5 ha. de 9 a 15 en caso de tener 7 ha. de 15 a 21 si son 10 ha. de 21 a 50 si se habla de 12 ha y más de 50 si son 20 ha; además, efectuar estudios geohidrológicos para determinar profundidad a la que se encuentra el manto freático, establecer dirección del flujo, velocidad de escurrimiento, composición química.</p>
Zona de Recarga	<p>Ubicar el relleno a una distancia mayor de un kilómetro y aguas abajo de las zonas de recarga de acuíferos o fuentes de abastecimiento de agua potable.</p>	<p>Se requiere realizar estudios geofísicos e hidrologicos.</p>
Localización		
Ubicación con Respecto a la Zona de Fracturación	<p>Construir la estructura una distancia horizontal mínima de 100m de la zona de fracturación o falla geológica.</p> <p>No se permitirá la construcción u operación del colocado sobre una zona de fracturación o falla geológica.</p>	<p>Determinar mediante sondeos geofísicos y otros estudios las zonas de fallas geológicas.</p>



<p>Ubicación con Respecto a los Cuerpos de Agua</p>	<p>Colocarse a una distancia mayor de 1 km de las zonas de inundación, cuerpos de agua y corrientes naturales.</p>	<p>Realizar estudios hidrológicos y geohidrológicos para: precisar los factores de escurrimiento de las aguas superficiales, delimitar cuencas, señalar los tiempos de avenidas y hestaje, determinar la profundidad del manto freático, establecer la dirección del flujo, la velocidad de escurrimiento y la composición química.</p>
<p>Ubicación con Respecto a los Centros de Población y Vías de Acceso</p>	<p>Ubicarse con respecto a una distancia mayor de 500 m de alguna área urbana, 70 m de vías terrestres, 3 km de áreas naturales protegidas y aeropuertos y 150 m de áreas de almacenamiento de hidrocarburos. Respetar un derecho de vía de 20 m de cada lado de las líneas de conducción de energía eléctrica, oleoductos, poliductos, gasoductos.</p>	<p>El objetivo de estas medidas es evitar: la proliferación de malos olores, daños por fauna nociva y vectores biológicos, explosiones por acumulación de gas, invasión vehiculos que depositen ilegalmente residuos, que algunos tipos de aves ocasionen problemas a los aviones de hélice y turbina, además de prevenir el contacto entre los diferentes componentes generados en el relleno (biogás y lixiviados) y los hidrocarburos.</p>
<p>Capacidad Volumétrica</p>	<p>Analizar la configuración topográfica que presente el predio donde se alojara el relleno sanitario, así como sus niveles de desplante. Se deberá reportar por cada curva de nivel la capacidad volumétrica parcial y acumulada.</p>	<p>La descripción detallada de la topografía indica los volúmenes parciales y acumulados que se manejan; si el tipo de suelo es adecuado y si es necesario excavar, el material que se obtenga será usado como de cobertura.</p>
<p>Topografía</p>	<p>La configuración del terreno, cumplirá con la siguiente recomendación: pendiente media en la base del terreno no mayor al 30%.</p>	<p>Este punto se justifica por la elevada erosión en pendientes pronunciadas y la dificultad de los equipos empleados para el movimiento de tierra y residuos presentándose para la construcción y operación.</p>

Tipo de Suelo		
Características Físicas de los Estratos del Suelo	Realizar el estudio geofísico correspondiente hasta una profundidad de 120 m.	Establecer mediante sondeos geofísicos y estudios en campo la estratigrafía del terreno. Para más información ver NOM-083-ECOL-1994 y NOM-083-ECOL-1996.
Características del Suelo	El suelo reunirá las condiciones de impermeabilidad y de remoción de contaminantes, representadas éstas por el coeficiente de permeabilidad de $1 \times 10^{-5}$ cm/s y por la capacidad de intercambio catiónico de 30 meq/100g de suelo. La autoridad competente podrá autorizar las medidas necesarias para el cumplimiento de éste requisito.	Establecer las propiedades mecánicas del suelo y realizar pruebas de campo para establecer valores congruentes.
Diseño		
Requerimientos para el Diseño	Cumplir con los estudios referente a la forma superficial y del perímetro del sitio, incluyendo planimetría y altimetría, establecimiento de secciones, configuración topográfica, cantidades y características de los residuos sólidos.	Se establecen una serie de requerimientos técnicos que se deben cumplir, para información detallada consultar el diario oficial del 22 de junio de 1994.

<p>Sistemas de Impermeabilización</p>	<p>Uso de los sistemas de impermeabilización en rellenos sanitarios donde el nivel de aguas freáticas se localicen a 10m. Los sistemas pueden ser de origen natural o sintético, tener una permeabilidad mínima de <math>1 \times 10^{-5}</math> cm/s y deben demostrar que no perderán sus propiedades al entrar en contacto con el lixiviado además de presentar adecuada resistencia a los esfuerzos que se generen en el relleno.</p>	<p>El uso de capas impermeables evita la migración de lixiviados hacia los mantos acuífero lo que muy probablemente implicaría la pérdida del recurso. Los valores establecidos de permeabilidad para éste tipo de sistemas son elevados.</p>
<p>Material para Cobertura</p>	<p>Suministro no menor del 25% de material de cubierta en relación al volumen de los residuo sólidos municipales a disponer diariamente.</p>	<p>El material de cubierta evita el desarrollo de fauna nociva y de vectores biológicos.</p>
<p>Drenaje</p>	<p>Las obras de drenaje se construyen en los límites del relleno con el fin de captar los escurrimientos aguas arriba, los canales deben ser cubiertos con materiales que eviten la erosión; la velocidad del flujo variará de 0.60 hasta 2.00 m/s. Para el diseño de los canales se utilizará la fórmula de Manning y el gasto de diseño se obtendrá con el método racional americano.</p>	<p>Evitar la inundación del relleno, lo que ocasionaría la generación excesiva de lixiviados y contaminación de los lugares del escurrimiento.</p>
<p>Construcción</p>	<p>Establecer el método de excavación (trinchera, área o combinado) para la construcción del relleno</p>	<p>Elegir el método más conveniente según las características del terreno.</p>

Dimensiones de la Celda Diaria	<p>Se debe respetar los conceptos que a continuación se presentan:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ altura de la celda (3m), tipos de cortes y taludes óptimos.</li> <li>◆ en el ancho de la celda, se consideran el tamaño de la maquina a usar.</li> </ul> <p>Considerar también las características de los residuos como: humedad, reducción de volumen, etc.</p>	<p>Considerar principalmente las características del suelo y la topografía del lugar.</p>
Volúmenes de Residuos a Disponer	<p>Obtener los requerimientos volumétricos para los años estimados mediante volúmenes totales anuales y acumulados tanto de residuos sólidos municipales así como para material de cubierta.</p>	<p>Proyectar los volúmenes generados para conocer la vida útil del sitio y si se requiere importar material de cobertura o sustituir el material.</p>
Sistemas de Captación y Extracción de Lixiviados	<p>Instalación de un sistema de captación de lixiviados que se localice sobre el sistema de impermeable, debe cumplir con las siguientes características: ubicarse en la base del relleno, transportar los líquidos rápidamente a los cárcamos de bombeo, las capas drenantes tendrán una pendiente mínima del 0.4% y su conductividad hidráulica <math>1 \times 10^{-5}</math> m/s para espesores de 0.30m o una transmisibilidad de <math>3 \times 10^{-6}</math> m/s para espesores menores.</p>	<p>La función es evitar el exceso de lixiviados en los rellenos sanitarios, en condiciones óptimas este líquido debe ser transportado a una planta de tratamiento de aguas residuales.</p> <p>La disminución del lixiviado evita problemas mayores de contaminación en caso de fugas.</p>

<p>Sistema para Captación de Biogás</p>	<p>Son estructuras verticales de 60 a 100 cm de lado a manera de chimenea, con malla y varilla y rellenos con piedra, la estructura se desplantará a 30 cm abajo del fondo del relleno y en la parte superior se cubre con una placa de concreto. Se instalarán 2 chimeneas/ha, el biogás extraído se quemará.</p>	<p>El objetivo es prevenir una posible explosión en el relleno.</p>
<p>Sistema de Monitoreo para Biogás</p>	<p>Se emplean para rellenos sanitarios que se construyan en huecos, barrancas, depresiones, etc; en donde se presenta migración de biogás en forma horizontal, los pozos de monitoreo se instalan a lo largo del perímetro del relleno con una separación de 5 m y a una distancia mínima de 2 m de los residuos sólidos, la profundidad será la de los residuos sólidos más 1 m.</p>	<p>La ausencia de sistemas de captación de biogás puede traer serias consecuencias, se debe que recordar que en concentraciones mayores al 15% en un volumen cualquiera el metano es explosivo</p>
<p>Pozos de Monitoreo para Lixiviados</p>	<p>Construir un mínimo de tres pozos de monitoreo; el primero, en la dirección del flujo de las aguas subterráneas a 500 m antes de llegar al sitio del relleno, el segundo, en el sitio del relleno sanitario y el último 500 m aguas abajo del relleno. Los pozos fuera del relleno deben profundizar 2 m dentro del acuífero y a nivel del relleno. El diámetro mínimo se especifica y se utilizarán materiales que no contaminen el acuífero.</p>	<p>Preferentemente se recomienda construir más pozos de muestreo evaluando los datos estratigráficos y geohidrológicos.</p>
<p>Operación</p>		
<p>Construcción de Caminos</p>	<p>Construir caminos exteriores e interiores que tengan trazo permanente, garanticen el tránsito de vehículos, capacidad de carga, permitan doble circulación de vehículos y tengan base y carpeta asfáltica.</p>	<p>El objetivo es garantizar el rápido movimiento de los vehículos en el relleno para agilizar el transporte de los residuos y evitar problemas de circulación en cualquier época del año.</p>

Área de Emergencia	Construir un área de emergencia para situaciones en las que las condiciones climáticas no permitan trabajar en el relleno. El área tendrá correcta ubicación, capacidad de operación ininterrumpida de 6 meses y suficiencia de cubierta.	Solucionará los casos de emergencia cuando existe algún problema en la celda o el frente de trabajo; por lo que se considera una parte fundamental del relleno.
Instalaciones de Energía Eléctrica	Satisfacer necesidades de iluminación en el relleno sanitario.	Se necesita para desarrollar varias de las actividades del relleno sanitario y de las oficinas administrativas.
Área Administrativa	Establecer un área para la construcción de oficinas administrativas.	Conseguir información adecuada para el control del relleno sanitario.
Servicios Sanitarios	Instalación conforme a lo dispuesto.	Construcción según lo establecido en el proyecto.
Obras Complementarias		
Obras Varias	El relleno sanitario deberá incluir además las celdas de confinamiento, una serie de obras complementarias que correspondan de acuerdo a la densidad de la población.	Construir áreas de acceso y espera, cerca perimetral, caseta de pesaje y báscula, área de amortiguamiento y almacén y cobertizo.
Cerca Perimetral	Colocación de una cerca con alambre o malla ciclónica.	Establecer una barrera para evitar la invasión del relleno mediante camiones no autorizados que descargan residuos u otros tipos de invasiones con diversos fines.
Caseta de Vigilancia	La dimensión mínima para la construcción de esta es de 4 m <sup>2</sup> .	La utilidad principal es llevar un registro de quienes llegan al lugar. Así, como una vigilancia continua del lugar para evitar descargas de otros tipos de residuos.

Caseta de Pesaje y Báscula	La instalación de la para el control y pesaje de los residuos que entran al relleno.	La exigencia del pesaje determina los volúmenes recibidos diariamente y con esto se controlan las cantidades dispuestas en el relleno.
Señalamientos	Se establecen para informar al usuario y restringir actividades.	
Área de Amortiguamiento	El diseño y construcción en un espacio perimetral de 15 a 30m que se refresta con especies que reduzcan la salida de polvos u otros materiales.	La utilidad es el sentido estético del relleno sanitario, además de evitar que el viento incida directamente transportando polvos y hules a las zonas aledañas.
Almacén y Cobertura	Se emplea para el guardado de herramientas, materiales de uso para el relleno, el tamaño permitirá maniobras y descargas.	Debe ser un lugar seguro para vehículos, materiales y herramientas.
Duración		
Vida Útil del Sitio	Se especifica una vida útil mínima de 7 años	La vida útil del sitio depende de la cantidad de residuos recibidos diariamente; para una mayor vida útil d el sitio es necesario establecer programas de educación en la población, reciclaje e incineración.
Clausura del Relleno	No se hace mención.	Señala la responsabilidad de cuidado y mantenimiento al relleno sanitario.
Posclausura del Relleno Sanitario	No se hace mención.	Indica el constante monitoreo del relleno y la remediación en caso de contaminación de acuíferos o daño a otros recursos.
Seguro Financiero	No se hace mención.	El objetivo es asegurar económicamente el uso de la mejor tecnología para minimizar o solucionar los posibles que puedan surgir.

**CAPÍTULO 4****EL USO DE CAPAS IMPERMEABLES EN LOS RELLENOS SANITARIOS**

4.1.	Requisitos para el Uso de Barreras Impermeables	55
4.1.1.	Permeabilidad	55
4.2.	Las Arcillas	56
4.2.1.	La Estructura de las Arcillas	56
4.2.2.	Capacidad de Intercambio Catiónico	58
4.2.3.	Minerales de Arcilla Utilizados para las Barreras Impermeables	59
4.2.4.	La Compactación de las Barreras Impermeables Naturales.	60
4.2.5.	El Control de Calidad en la Construcción de las Barreras Arcillosas	60
4.2.6.	Problemas Comunes de las Barreras Impermeables Naturales	62
4.2.7.	Procesos Químicos, Físicos y Biológicos entre la Arcilla y los Lixiviados	62
4.3.	Geomembranas	63
4.3.1.	Propiedades	64
4.3.2.	Selección	67
4.3.3.	Interacción de la Geomembrana con Suelos y Geosintéticos	71
4.3.4.	Anclaje de las Geomembranas	72
4.3.5.	Sistemas para Unión de Geomembranas	74
4.3.6.	Preparación de las Geomembranas en Campo	75
4.3.7.	Proceso General de Control de Calidad en Campo	76
4.4.	Tipos de Enlaces	80
4.4.1.	Fallas que se pueden Presentar en la Geomembrana	92
4.4.2.	Estabilidad de Taludes en los Rellenos Sanitarios	97
4.4.3.	Estabilidad del Suelo de Cubierta que Protege a la Geomembrana	99



#### 4.1. Requisitos para las Barreras Impermeables.

La *Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente* señala, a través del *Diario Oficial de la Federación* del 22 de junio de 1994 los siguientes requisitos para el tipo de suelo: "Deberá reunir condiciones tanto de impermeabilidad como de remoción de contaminantes, representadas estas por el coeficiente de permeabilidad de  $1 \times 10^{-5}$  cm/s y por la capacidad de intercambio catiónico de 30meq/100g de suelo o membrana artificial ", más adelante también se dice que "el sistema de impermeabilización podrá ser de origen tanto natural, artificial o una combinación de ambos, asegurar la permeabilidad citada y demostrar que los materiales que integran el sistema no se deteriorarán ni perderán sus propiedades y tienen que ser resistentes a los esfuerzos físicos que resulten del peso de los materiales y residuos que serán colocados sobre este sistema de impermeabilización".

Para garantizar el control de calidad en el uso y colocación de suelos se especifica que: "los materiales de origen natural pueden ser importados o bien del mismo sitio y en ambos casos se deberá especificar el manejo a dar para reducir su permeabilidad a los límites establecidos o en su defecto comprobar que su espesor es capaz de absorber o atenuar la carga contaminante de los lixiviados, evitando su migración hacia los acuíferos".

Por otra parte la NOM-083-ECOL-1996, señala que se deben alcanzar conjuntamente entre el suelo y la barrera impermeable valores de infiltración inferiores a  $3 \times 10^{-10}$   $\text{seg}^{-1}$ , para se pueda construir el relleno sanitario en ese lugar.

El valor de la conductividad hidráulica o permeabilidad es el concepto relacionado a las velocidad de infiltración que se requiere, ya que establece teóricamente el tiempo en que el lixiviado atraviesa la barrera.

##### 4.1.1. Permeabilidad

Peck et al 1982, define que un material es permeable cuando tiene huecos o intersticios continuos. Esta propiedad está influida por la relación de vacíos, el tamaño de las partículas, la composición mineralógica y la fisicoquímica del suelo, su estructura, grado de saturación y porosidad. La permeabilidad o conductividad hidráulica ( $k$ ) dada por Darcy, se define como:

$$v = k \times i$$

donde,

$v$  = es la velocidad del flujo,

$i$  = gradiente hidráulico.

$k$  = constante de proporcionalidad o coeficiente de permeabilidad

La relación entre la porosidad y la permeabilidad de la masa o matriz del suelo se determina al analizar de forma microestructural la orientación y alineación de partículas y como afectan la permeabilidad, son los resultados de la revisión macroestructural los que indican problemas como: agrietamiento, juntas, fisuras y perforaciones por raíces que aumentan considerablemente la conductividad hidráulica.

De los tipos de suelos existentes en la naturaleza, los que presentan mejor funcionamiento impermeable son las arcillas. Sin embargo, esta no es la única alternativa para intentar solucionar el problema ya que desde hace varias décadas han sido desarrollados barreras impermeables artificiales (geomembranas), las cuales han dado buenos resultados ya que resisten mejor el ataque de las sustancias contaminantes.

## 4.2. Las Arcillas

Las arcillas son suelos finos (tamaño de partícula menor a 0.074 mm) formados por minerales, éstas pueden tener alta (CH) o baja compresibilidad (CL). Generalmente, estos suelos han sido ampliamente usados como barreras impermeables en obras de ingeniería.

Desde la perspectiva ambiental, las arcillas atenúan la acción de los contaminantes presentes en los lixiviados y algunos minerales constitutivos tienen baja sensibilidad a dichas sustancias, lo que favorece su funcionamiento como materiales impermeables.

Las características que influyen en el comportamiento de la impermeabilidad de la arcilla son:

- ◆ la estructura,
- ◆ la capacidad de intercambio catiónico,
- ◆ la composición mineral de la arcilla.

Existen otros factores que favorecen la obtención de valores óptimos de la conductividad hidráulica, estos son:

- ◆ la compactación,
- ◆ el control de calidad utilizado para la compactación,
- ◆ la composición química de los lixiviados.

Los conceptos anteriores influyen significativamente en el funcionamiento de la barrera natural impermeable, el no considerarlos seguramente producirá que el sistema funcione deficientemente.

### 4.2.1. La Estructura de las Arcillas

Las partículas de arcilla tienen una forma laminar de tamaño menor a 0.002 mm. Son afectadas principalmente por fuerzas electromagnéticas ya que la relación entre su superficie y peso (superficie específica) es muy alta. Los principales minerales que la constituyen son la *caolinita*, *ilita*, *clorita* y *esmectita* (McBean, et al 1995, Oweis et al 1990, Peck et al 1982). Las partículas de arcilla poseen carga eléctrica positiva en las secciones planas de la partícula y variable en los bordes.

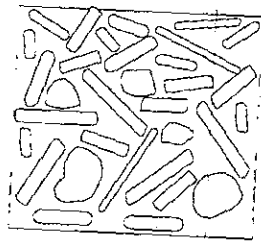
El origen de las diferentes familias minerales de la arcilla, así como algunos depósitos donde se localizan se muestra en la *tabla 4.1*.

Familia Mineral	Grupo	Origen	Material Presente	Localización
Caolinita y Halosita.	Caolinita	Por la erosión de suelos con feldespatos alcalinos, silicatos y rocas sílicas.	Altas cantidades de aluminio y bajas cantidades de silicatos.	Depósitos fluviales y residuales.
Illitas y Vermiculitas	Illita	Por la degradación de la muscovita, biotita y por la alteración de otras arcillas. El proceso se efectúa en condiciones alcalinas	Altas cantidades de: aluminio, potasio y magnesio.	Depósitos sedimentarios a lo largo de valles y planicies
Clorita	Clorita	Por alteraciones de otras arcillas en presencia de magnesio o por la degradación de los minerales ferromagnesianos. El proceso se efectúa en condiciones alcalinas	Altas cantidades de hierro y magnesio y bajas cantidades de aluminio.	Suelos lacustres.
Esmeclita	Montmorillonitas	Por la erosión de rocas ígneas básicas y en lugares donde existe poco drenaje.	Altas cantidades de: magnesio, calcio, y aluminio y bajas de potasio y sodio.	Suelos lacustres, zonas húmedas de pobre drenaje y regiones áridas y semiáridas.

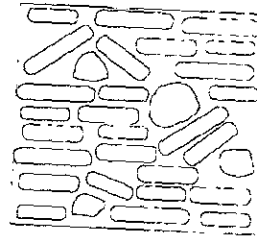
Tabla 4.1 Familias de minerales de la arcilla.

La estructura de los suelos arcillosos se define como el arreglo que adoptan las partículas minerales debido a su tamaño. Las formas extremas comunes en la estructura son: la floculenta y la dispersa. Si el efecto de las fuerzas electromagnética es positivo en las caras laminares y negativo en los bordes entonces forman el primer tipo de estructura; en caso de presentarse el mismo tipo de carga en toda la partícula se obtiene el tipo disperso.

La situación estructural origina la disminución del flujo del agua en el suelo por causa de la adsorción que se forma entorno a los cristales. En suelos con estructura dispersa se tienen mayores flujos en la dirección paralela a las caras alineadas y muy bajos en la parte perpendicular a las caras de las láminas (flujo vertical menor) (Marsal y Resendiz, 1968; Rico y Del Castillo, 1974 y Goldman et al 1990), como se muestra en la figura 4.1.



Estructura floculada



Estructura dispersa

Figura 4.1 Estructuras extremas de la arcilla

La dispersión de partículas en la estructura establece la anisotropía hidráulica. La estructura dispersa tiene una orientación *cara - cara* y presenta una estratificación a microescala que provoca una disminución en la conductividad hidráulica en el sentido vertical, pero un aumento en el sentido horizontal. La estructura floculada, que está formada por una orientación *cara-borde*, presenta una conductividad hidráulica similar en sus ejes. En general, se dice que la orientación establece la variación de estructuras en la matriz o masa del suelo dando origen al tamaño de los poros. Los grupos de minerales arcillosos que presentan una alta dispersividad son: las illita, las vermiculares, y las montmorilonitas. La adición de dispersantes químicos en las arcillas, además de la compactación por amasado, provoca una mejor dispersión y la disminución de la conductividad hidráulica en uno o dos grados de magnitud.

#### 4.2.2. Capacidad de Intercambio Catiónico

Las condiciones de acidez y alcalinidad en los suelos influyen en la remoción y el desprendimiento de diferentes tipos de cationes; esta propiedad que se presenta en los suelos arcillosos, sirve para atenuar diferentes sustancias contaminantes que se originan en el sitio de disposición.

Los minerales de la arcilla presentan características útiles para establecer el posible comportamiento de la barrera impermeable. En la tabla 4.2, se observa la relación existente entre el mineral de arcilla, la capacidad de intercambio catiónico y la sensibilidad de los minerales de arcilla a diferentes sustancias presentes en los rellenos sanitarios (lixiviados y compuestos químicos).

Míneral de la Arcilla	Capacidad de Intercambio Catiónico (meq/100g)	Superficie Específica (m <sup>2</sup> /g)	Índice de Expansión	Características	Sensibilidad a Sustancias
Atapulgita	0-4			Muy baja actividad electroquímica y baja dispersión de partículas.	Muy baja.

Caolinita Sodio Calcio	5-15	10-20	0.20 0.06	Baja actividad electroquímica y baja dispersión de partículas.	Baja.
Halosita	5-40	35-70	-	Mediana actividad electroquímica.	Mediana.
Illita Sodio Calcio	10-40	65-100	0.15 0.21	Mediana actividad electroquímica.	Mediana.
Clorita	40-100	65-100	-	Actividad electroquímica de mediana a alta.	Mediana.
Verniculitas	100-150	65-100	-	Alta actividad electroquímica.	Alta.
Montmorilonita Sodio Calcio	80-150	700-840	2.50 8.00	Actividad electroquímica extrema. Alta expansividad.	Extremadamente alta.

Tabla 4.2 Relación entre minerales de arcilla, capacidad de intercambio catiónico y sensibilidad a sustancias presentes en rellenos sanitarios.

#### 4.2.3. Minerales de Arcilla Utilizados para las Barreras Impermeables

Cuando los lixiviados entran en contacto con las barreras impermeables arcillosas, la arcilla se daña, lo que se traduce en aumentos de la conductividad hidráulica. El incremento está relacionado con la sensibilidad del mineral constitutivo de la arcilla hacia la sustancia, Broderick et al 1990, señalan que las arcillas con baja actividad electroquímica (principalmente atapulgita y caolinita) son más resistentes al ataque de sustancias químicas. Las illitas y cloritas presentan mediana resistencia a los lixiviados en la mayoría de los casos.

Los minerales que forman las montmorilonitas, presentan problemas de aumento de la conductividad hidráulica al entrar en contacto con lixiviados y otras sustancias contaminantes. Dobras et al 1993, Daniel et al 1993; McBean et al 1995; Daniel et al 1997 y Ruhl et al 1997, señalan aumentos en la permeabilidad de la bentonita, en donde se observaron valores de hasta  $1 \times 10^{-5}$  cm/s, después de que los lixiviados y algunos compuestos entraron en contacto las barreras impermeables y membranas flexibles, construidas a base de este mineral. Resultados favorables se obtuvieron cuando la bentonita fue tratada con amortiguadores y polímeros o fue saturada con agua del 75 al 100%, antes de entrar en contacto con los contaminantes.

#### 4.2.4. La Compactación de las Barreras Impermeables Naturales

El principal objetivo de la compactación de un suelo es mejorar sus propiedades mecánicas; reducir el porcentaje de vacíos de aire con el fin de incrementar su densidad para conseguir la baja permeabilidad, se requiere conseguir la realinación de partículas y la dispersión de la estructura, para esto, lo recomendable es que el suelo tenga un contenido de humedad mayor al óptimo y que se utilice la compactación por amasado. Goldman, et al 1990, indica que se han obtenido permeabilidades menores a  $2 \times 10^{-8}$  cm/s por el uso de sistemas de compactación por amasado (con rodillos "pata de cabra). Mientras que con el uso de rodillos lisos con dificultad se logra  $1 \times 10^{-7}$  cm/s, aunque se alcance la misma densidad específica en los dos casos.

Estudios realizados por Elsbury et al 1990, indican que el tamaño de los terrones, el contenido de humedad, el espesor de la barrera y la energía transmitida, influyen significativamente en la permeabilidad de la barrera natural impermeable.

#### 4.2.5. El Control de Calidad en la Construcción de las Barreras Arcillosas

Mundell (1985), Goldman et al 1990 y Gordon et al 1990, señalan que para la correcta construcción de las capas de arcilla se necesita:

- ◆ Establecer una cimentación adecuada (limpieza del terreno, nivelación, colocación de terracería y compactación) y evitar apoyarse sobre suelos que puedan tener fuertes asentamientos diferenciales.
- ◆ Señalar la composición mineralógica del suelo, graduación e índice de plasticidad.
- ◆ Revisar la posible variación en las características fisicoquímicas de las arcillas al extraerse y transportarse, controlar del tamaño de los terrones (menores a 2.5cm) y preferir heterogeneidad en éste tipo de material.
- ◆ Especificar la humedad óptima y el peso volumétrico seco máximo.
- ◆ Señalar, medir y evaluar la compactación.
- ◆ Controlar la correcta compactación de las capas y revisar la integración y el funcionamiento.
- ◆ Establecer un espesor adecuado de las capas al compactar (de 15 a 23 cm).
- ◆ Señalar el espesor óptimo de diseño para el sistema convencional (1.0 a 1.5m) o doble (0.5m o mayor) de la barrera impermeable, habiendo evaluado las características climáticas existentes.
- ◆ Usar como humedad óptima la correspondiente al 95% de la prueba Proctor Estándar.

Daniel (1990) y Mitchell et al 1990, hacen las siguientes observaciones:

- ◆ El equipo que se utilizará para compactar la base del relleno debe tener un peso no menor a 18 t, para las zonas de pendientes y taludes el peso será de 14 t.
- ◆ Aunque el número de pasadas está en función de las características del material a compactar y de la máquina, se ha observado que en rellenos donde se han utilizado los equipos indicados se requiere un número de pasadas mayor a 5.
- ◆ Usar una capa de protección que cubra las compactadas con rodillos "pata de cabra", ya que ésta servirá como una "costra" que evite la pérdida de humedad en el sistema. La construcción en este caso, debe realizarse con un compactador con rodillos lisos.

- ◆ Realizar una escarificación mínima de 2.50 cm de profundidad antes de colocar la primera capa de material (cimentación) para garantizar el adecuado enlace y evitar la separación entre las capas y el surgimiento de rutas por donde pueda transportarse el lixiviado. Este proceso, se debe repetir antes de colocar cada capa y compactarla.
- ◆ Verificar la energía de compactación que se aplicará, para los equipos de 20 t la energía óptima es de 477 kg/m.
- ◆ Agregar en promedio un 3% más de agua al material que se ha de compactar, ya que al colocarse frecuentemente pierde esta cantidad por evaporación.
- ◆ La cantidad máxima de grava permitida en la construcción es del 10 al 20%, se recomienda que se utilice grava fina ( de 4.76 a 19 mm),
- ◆ Realizar terraplenes de prueba antes de empezar a construir las barreras, esto para obtener el número óptimo de pasadas.
- ◆ Verificar las propiedades de la arcilla después de compactarse durante los primeros meses para asegurarse de que no sufrió una realineación estructural.
- ◆ Revisar la ductilidad de las capas para evitar problemas por surgimiento de algún asentamiento diferencial.
- ◆ Diseñar adecuadamente el sistema de extracción de lixiviados y mantenerlo en funcionamiento constante, ya que el aumento del gradiente hidráulico, el peso de los residuos y el movimiento del equipo, provocan un aumento de presión en la capa y el incremento de la conductividad hidráulica.

Las pruebas en materiales (realizadas cada vez que el material alcanza un volumen compactado especificado) están especificados en las normas ASTM 1140 y ASTM D422, conocidas como las de porcentaje de finos y gravas respectivamente, la ASTM D4318 (límite líquido y plástico) y de contenido de humedad (ASTM D2216), las anteriores se practican cada 760m<sup>3</sup>; la prueba ASTM 4643 (contenido de agua) se aplica además cada 150m<sup>3</sup>.

Para preparar la superficie donde se compactarán las capas, se requiere escarificar y compactar previamente una capa delgada del mismo tipo de material. Después de esto, al comprimir las siguientes capas se obtiene la prueba ASTM D2167 o de porcentaje de compactación cada 4 000m<sup>2</sup> y la curva de compactación (ASTM D698) se presenta cada 20 000m<sup>2</sup>.

En la colocación de suelos se necesita implementar un sistema de señalamiento de estacas para medir el espesor del material que se coloca y compacta.

La valuación de la compactación y de suelos se realiza de la siguiente manera: contenido de humedad (ASTM D3017) 5 pruebas/4 000m<sup>2</sup>/capa y ASTM D2922 1 prueba/4 000m<sup>2</sup>/capa, densidad específica mediante ASTM D2937 5 pruebas/4 000m<sup>2</sup>/capa y ASTM D1556 1 prueba/4 000m<sup>2</sup>/capa, número de pasadas se realiza 1 prueba/4 000m<sup>2</sup>/capa, la observación es constante.

Es posible establecer criterios más estrictos de aseguramiento de calidad, Gordon et al (1990), menciona la necesidad de realizar hasta 12 pruebas / ha / capa para determinar el contenido de humedad y la densidad específica.

En la mayoría de las tomas de pruebas se necesitará sellar con bentonita todos los lugares de donde se extrajeron las muestras.

#### 4.2.6. Problemas Comunes de las Barreras Impermeables Naturales

Mitchell y Jaber (1990); Rhul y Daniel (1997) mencionan en diferentes estudios que los problemas que afectan de forma repetitiva la construcción y el aumento de la conductividad hidráulica en las barreras de arcilla son:

- ◆ Errores en la humedad óptima, empleo de inadecuados equipos de compactación y colocación de espesores mayores de 25cm del material a compactar.
- ◆ Fallas en la protección de las capas de arcilla lo que ocasiona agrietamientos.
- ◆ Homogeneidad en los terrones de arcilla a compactar.
- ◆ Variaciones en los parámetros fisicoquímicos que originan cambios en la humedad y fuerza de compactación requeridas para lograr las especificaciones de diseño.
- ◆ Diseño inadecuado en el espesor de la barrera, es decir, se utilizan espesores menores.
- ◆ Necesidad de importación de grandes cantidades de material arcilloso.
- ◆ Variaciones en las técnicas para calcular la conductividad hidráulica.
- ◆ Poca información en relación al tiempo en que las barreras mantienen sus propiedades químicas cuando están en contacto con el lixiviado.
- ◆ Dificultad al compactar arcillas plásticas, además del secado rápido y de las grietas por secado.
- ◆ Agrietamientos por los ciclos de secado y humedecimiento de las barreras compactadas.

Es preciso analizar la composición del suelo a compactar para seleccionar el compactador ("pata de cabra" en suelos arcillosos), y dejar una pendiente mayor al 2% al terminar, esto para permitir que cuando se construya el sistema de extracción de lixiviados, no existan problemas de estancamiento del líquido.

McBean et al 1995, cita estudios efectuados en 1987 con suelos mejorados mediante mezclas de bentonita, polímeros, materiales cementantes y cenizas, obteniéndose bajas permeabilidades ( $1 \times 10^{-8}$  cm/s). Sin embargo, posteriores investigaciones (Farquhar, 1989), demostraron que éstos presentan *incompatibilidad química* con algunas sustancias originadas en los lixiviados, lo que provocó el agrietamiento de estos y el aumento en la conductividad hidráulica.

#### 4.2.7. Procesos Físicos, Químicos y Biológicos entre la Arcilla y los Lixiviados

Cuando el lixiviado se genera se introduce a través de la capa arcillosa mediante advección y difusión, ya que la capa se encuentra mucho tiempo expuesta al lixiviado, la interacción que se realiza provoca el surgimiento de precipitaciones y biomasa en la superficie de la barrera o cerca de esta. Los procesos presentes son adsorción, precipitación, biodegradación y filtración.

En relación al comportamiento de las barreras y los compuestos presentes en los lixiviados, McBean et al 1995, menciona que:

- ◆ En los carbonatos se desarrollan procesos de disolución ya que el tiempo en que el lixiviado mantiene la acidez es mínimo por lo que no surgen problemas en la barrera arcillosa.
- ◆ En los cationes se desarrollan procesos de remoción, esto no causa daños en la arcilla, aunque si precipitaciones de metales pesados.



- ◆ Existe remoción de aniones, lo que ocasiona la ruptura de la capa de arcilla ya que está limitada en relación a la capacidad de adsorción.
- ◆ En contaminantes inorgánicos (sales, ácidos y bases), no se ha observado daño pero si altas cantidades de precipitados por la neutralización de los ácidos.
- ◆ En orgánicos biodegradables, se obtienen altas cantidades de biomasa lo que provoca la ruptura de la barrera arcillosa, aunque se han presentado casos de obstrucción de flujos de lixiviados por la biomasa en la superficie.
- ◆ Solventes orgánicos, originan la alteración de la estructura arcillosa lo que se traduce en el rompimiento y el considerable aumento de la conductividad hidráulica.

#### 4.3. Geomembranas

Las geomembranas se fabrican mediante hojas continuas de polímeros. Al manufacturarse, se les agregan diferentes tipos de aditivos que proporcionan rigidez, flexibilidad, resistencia a la radiación ultravioleta, ozono y al ataque de hongos y bacterias; el uso de antioxidantes disminuye el rápido envejecimiento. Para incrementar la resistencia se refuerza el tejido con nylon y poliéster; la variación de los parámetros anteriores originan las características de la geomembrana, es importante señalar que las barreras impermeables también pueden elaborarse con algún geotextil, elastómero, asfalto o bentonita, formando los sistemas híbridos.

Estas capas impermeables son parte de los materiales llamados geosintéticos, que tienen su principal aplicación en las tecnologías emergentes para el mejoramiento de suelos.

La aplicación de las geomembranas en proyectos ambientales se originó en 1982, por mandato de la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos. El método 9090 de la Agencia determina la resistencia de esta a diferentes sustancias químicas.

Las características más importante de las geomembranas en relación al aspecto ambiental son la resistencia a las sustancias químicas y la baja permeabilidad (que se mide en función de la transmisión del vapor de agua a través de la capa), los valores típicos se encuentran entre  $0.5 \times 10^{-10}$  cm/s y  $0.5 \times 10^{-13}$  cm/s.

Koerner (1986), y Weiss, et al, 1995, afirman que el uso de las geomembranas en los rellenos sanitarios proporciona certidumbre con respecto al comportamiento del material, reduce la generación y la salida de lixiviados, controla el movimiento del biogás, es una forma económica de protección en comparación con la transportación y compactación de los suelos. En caso de usar algún otro tipo de geosintético en el sistema, se conocen sus características. Así como, el funcionamiento en conjunto.

Existen diversos tipos de geomembranas, y se identifican según el material que se haya utilizado para su fabricación, los materiales más comunes son:

- ◆ Los *Polímeros Termoplásticos* se fabrican los lienzos de policloruro de vinilo (PVC), polietileno de muy baja densidad (VLDPE), polietileno de baja longitud de densidad (LDPE), polietileno de mediana densidad (MDPE), polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno clorhidratado (CPE), poliolefina elastizada (3110), aliación de etileno interpolimerizado (EIA o XR-5), poliamida, (PA).

La prueba ASTM 1388 (de flexión y rigidez) clasifica la dureza del material de fabricación. Así se tiene que en el caso del polietileno, cuando más del 50% de los valores de la dureza son mayores a 1000 g-cm entonces se trata de polietileno de alta densidad, este se forma con resina de

polietileno en un 97%, con un rango de densidad de 0.935 a 0.937g/cm<sup>3</sup>, cuando se le aumenta carbón negro para disminuir la sensibilidad a la radiación ultravioleta aumenta su densidad hasta 0.941 g/cm<sup>3</sup> que es el límite inferior definido para el HDPE. La cantidad de carbón negro que se encuentra en este tipo de geomembrana es de 2 a 2.5%, el resto (0.5 a 1%) son sustancias que sirven como antioxidante, lubricante o para aumentar la viscosidad del polímero. Este tipo de material es considerado como semicristalino, por lo que en algunas ocasiones presenta problemas en los sistemas de enlaces.

El resto de las geomembranas termoplásticas consideradas de baja cristalinidad ya que los valores de la prueba son menores a 1000 g-cm, tienen la ventaja de ser más flexibles y no presentar problemas ante los diferentes tipos de enlace. Las cantidades de los compuestos que forman las geomembranas (resinas, plastificantes, carbón negro, rellenos y otras sustancias), varían según el tipo de geomembrana.

Es importante mencionar que contenidos de carbón negro superiores al 2.5% producen problemas en la estructura de la geomembrana de polietileno.

- ◆ Los *Polímeros Termofraguados* sirven para las capas de isopropano - isobutileno (IIR), hule de epiclorohidrin, monómero de etileno propileno diana (EPDM), policloropreno (Neopreno), terpolímero etileno propileno (EPT), polipropileno (PP), acetato de vinil etileno (EVA).
- ◆ Los *Polímeros Combinados* dan las características a PVC- hule de nitrilo (PE-EPDM), PVC- acetato de vinil etileno, cruzamiento - unión de CPE, clorosulfonato de polietileno (CSPE o Hypalon).

De los tipos de polímeros que se han fabricado, algunos son reforzados. Esta característica se logra mediante un tejido interno o por la colocación de alguna sustancia que se rocía sobre la superficie, provocando un incremento en las propiedades mecánicas, las geomembranas más conocidas que presentan este refuerzo son Aliación de Etileno Interpolimerizado (EIA o XR-5), polietileno clorhidratado (CPE), clorosulfonato de polietileno (CSPE o Hypalon),

#### 4.3.1. Propiedades

Según la Sociedad Americana para Pruebas de Materiales (ASTM), las geomembranas tienen propiedades *físicas, mecánicas, biológicas y térmicas*.

##### *Propiedades Físicas*

Indican el espesor, densidad, peso por unidad de área, transmisión de vapor de agua y solventes.

Espesor : al medir el grosor de la capa bajo presiones específicas (ASTM D3767).

Densidad: para obtener las características del peso y volumen del material con respecto a los líquidos (ASTM D792 y ASTM 1505).

Masa: también definida como peso por unidad de área (ASTM D1910).

Transmisión al vapor de agua: para determinar la conductividad hidráulica de manera aproximada para el agua (ASTM E96).

Transmisión del vapor de solventes: que sirve para determinar la atracción entre los fluidos y la capa con el que se determina la capa óptima para diferentes solventes (ASTM D1434 y ASTM D814).

##### *Propiedades Mecánicas*

Éstas se determinan mediante las pruebas de comportamiento a tensión y unión entre lienzos, resistencia al desgarre, impacto y perforación, fricción, anclaje, grado máximo de tensión y fractura por carga constante.

Comportamiento a tensión: determina las variaciones de espesor de la capas cuando se tienen diferentes valores (máximo y último). Así como los módulos de elasticidad de las capas (ASTM D412, ASTM D638 y ASTM D882).

Comportamiento en la unión entre lienzos: señala las características de los sistemas de unión evaluando el tipo de material, detalla los procedimientos de control de calidad para la unión y los puntos de posible falla. Además del análisis por la elongación de la capa (ASTM D638, ASTM D882, ASTM D413, ASTM D638, ASTM D3083).

Resistencia al desgarre: compara resistencias entre los sistemas de tejido y refuerzo de las diferentes geomembranas e indica valores críticos para el diseño (ASTM D2263, ASTM D1004, ASTM D751, ASTM D1424, ASTM D2261 y ASTM D1938).

Resistencia al impacto: determina la resistencia a la penetración y a la propagación del corte (ASTM D 1709, ASTM D3029 y ASTM D3998).

Resistencia a la perforación: establece los valores a los que se perfora la capa mediante sistemas de compresión y hace recomendaciones en relación al uso de geotextiles o filtros en las caras de la capa para disminuir esfuerzos (ASTM D2582).

Fricción en la geomembrana : evalúa el esfuerzo cortante que la membrana soporta al desplazarse en diferentes superficies.

Anclaje en la geomembrana: analiza como soporta la capa los de esfuerzos de tensión, compresión y deslizamiento en las caras.

Esfuerzo de fractura o grado máximo de tensión en tiras del material: evalúa la calidad y características del material de fabricación, se somete a esfuerzos cortantes por zonas con tiempos de duración establecidos ( ASTM D1693).

Esfuerzo de fractura a carga constante: analiza la afectación del tejido al colocar materiales o sustancias a altas temperaturas, después se aplica una carga constante y se revisa nuevamente el estado del material (ASTM D2552).

#### *Propiedades Químicas*

Se componen de la resistencia a la expansión, compuestos químicos, ozono y rayos ultravioleta.

Resistencia a la expansión: determina el comportamiento de la capa cuando absorbe diferentes compuestos y señala daños en las zonas de unión entre lienzos (ASTM D570).

Resistencia química: analiza reacciones y daños que sufre la capa en su estructura al someterla ante sustancias en lapsos de tiempo establecidos, posteriormente se realizan nuevamente las pruebas anteriores para analizar posibles cambios en las propiedades (ASTM D534).

Resistencia al ozono: analiza los cambios de la capa al ser expuesta al ozono y a diferentes condiciones de esfuerzo durante períodos de tiempo variables (ASTM D518).

Resistencia a rayos Ultravioleta: determina la volatilidad que sufren algunas sustancias que componen la materia prima de las geomembranas, también la capa es analizada para verificar cambios en las propiedades (ASTM D3334).

### *Propiedades Biológicas*

Se componen de los análisis de resistencia a hongos y bacterias.

Resistencia a los hongos: determina el grado de sensibilidad ante esta especie (ASTM G21).

Resistencia a las bacterias: determina el grado de sensibilidad ante esta especie (ASTM G22).

### *Propiedades Térmicas*

El comportamiento a bajas temperaturas y el coeficiente de expansión constituyen este concepto.

Comportamiento a bajas temperaturas: analiza la flexibilidad en temperaturas menores de las especificadas y problemas que se presentan en las técnicas para la costura (ASTM D1870).

Coeficiente de expansión: determina los coeficientes de contracción y expansión del material ante diversas condiciones (ASTM D2102, ASTM D2259, ASTM D1042 y ASTM D1204).

La *Identificación de Propiedades* establece las propiedades específicas de cada tipo de geomembrana, considera parámetros moleculares; la utilidad principal es seleccionar de manera adecuada la capa considerando el uso que se le dará, los siguientes aspectos forman el concepto:

Análisis termogravimétrico: establece el desprendimiento de vapor, resinas, carbono y cenizas mediante un programa de variación de temperatura.

Diferencial calorimétrico: indica los procesos exotérmicos y endotérmicos y la relación que tienen con la cristalización de las capas, obtiene un análisis detallado del polímero y porcentajes de cristalización esto sirve para recomendar los tipos de enlace entre capas.

Análisis termomecánico: mide las variaciones de los polímeros a distintas temperaturas mediante pruebas de corte, penetración y expansión.

Análisis mecánico - dinámico: precisa deformaciones a tensión constante y a temperatura ambiental controlada, también evalúa la viscoelasticidad, rigidez y vitrificación.

Índice de fundición: consigue el derretimiento y la fluidez del polímero en tiempos variables (ASTM D1238).

Peso molecular: obtiene mediante sistemas de evaluación estadística el peso molecular.

---

#### 4.3.2. Selección

Antes de elegir la geomembrana es necesario conocer: el espesor óptimo, el sistema de enlace, las características de los lixiviados o sustancias agresivas que se dispondrán, el tipo de anclaje, la altura del talud y los materiales que se colocarán bajo y sobre la capa, la forma de entrega de la geomembrana, el ancho y la longitud de los lienzos, el sitio de colocación y las distancias a recorrer.

Taylor y Schader 1993, han evaluado cuatro tipos de geomembranas utilizadas ampliamente en rellenos sanitarios y centros de confinamiento en los Estados Unidos y Canadá, llegando a las siguientes conclusiones:

##### *Clorosulfonato de Polietileno (CSPE o Hypalon)*

Las principales ventajas que presenta son la flexibilidad, la facilidad de instalación, la alta resistencia a perforaciones y rasgaduras (debido a la forma del tejido), el aumento de la resistencia al acomodarse en el sitio, la alta resistencia química (alrededor del 95%) a las sustancias presentes en los lixiviados, garantía por 20 años.

El material presenta fallas al exponerlo largos períodos de tiempo a algunas sustancias derivadas del petróleo. Los sistemas adhesivos para la unión entre lienzos inducen la falla de la capa o el paulatino desprendimiento de las partes que están en contacto. Se recomienda utilizar sistemas de enlace químicos con sustancias totalmente compatibles.

##### *Aleación de Etileno Interpolimerizado (EIA o XR5)*

La más importante ventaja de éste material es su alta resistencia química y mecánica sin pérdida de flexibilidad, tiene 10 años de garantía. Se recomienda utilizar uniones mediante fusión. La principal desventaja, es la dificultad de reparación después de haber tenido contacto con sustancias químicas agresivas.

##### *Polietileno de Alta Densidad (HDPE)*

Ha sido usado por más de 10 años en los rellenos sanitarios de diversos países dando buenos resultados, funciona adecuadamente con los sistemas de unión, es económica, muestra una adecuada expansión y contracción térmica ante variaciones severas de la temperatura, es prácticamente impermeable al biogás y presenta alta resistencia a la degradación por rayos ultravioleta.

Los problemas que han sido observados son la rigidez del material al usar espesores mayores a 1.5 mm (en algunos rellenos sanitarios y centros de confinamiento se recomiendan espesores no menores a 2.00mm), por lo que se presentan dificultades al trabajar a bajas temperaturas, ocasionalmente falla por tensión y por el surgimiento de variaciones en las cargas (fatiga).

##### *Polipropileno (PP)*

Generalmente, tiene alta resistencia mecánica aún en temperaturas extremas, resiste los aceites y grasas comunes en los rellenos sanitario, se logran buenas uniones y reparaciones utilizando sistemas de aire caliente. Las dificultades detectadas son: el bajo coeficiente térmico (contracción - expansión) y dificultades con los sistemas de juntas.

### *Geomembranas de Bentonita (GCL)*

Existen en el mercado los llamados *sistemas impermeables híbridos (formados por geotextiles de bentonita y asfalto)*. Bonaparte et al 1990 y Daniel et al 1993, indican que las geomembrana de bentonita alcanzan hasta  $1 \times 10^{-12}$  cm/s, cuando se han saturado al menos al 100% antes de entrar en contacto con los lixiviados u otras sustancias químicas.

Cuando los contenidos de humedad son menores al 75% existen problemas por la remoción de los minerales ( incrementándose la conductividad hidráulica hasta  $1 \times 10^{-5}$  cm/s). Por lo anterior, se recomienda saturar el material y colocarlo en conjunto con otra barrera impermeable.

El uso más amplio eficiente y seguro de la bentonita, se ha dado en los sistemas de cubierta, donde solamente entra en contacto con el agua, funcionando adecuadamente aún después del las fases de secado ya que se recupera rápidamente de los agrietamientos, al entrar nuevamente en contacto con la humedad. Al interactuar con el geotextil, se adapta a los asentamientos diferenciales; los enlaces entre lienzos presentan una relativa dificultades ya que no resisten desplazamientos mayores al 7%.

Según Drushel y Underwood (1993), estos son los principales problemas cuando los sistemas se fabrican en campo: el deficiente funcionamiento de los dos componentes (geotextil-bentonita o geotextil- asfalto) al trabajar en conjunto, no resisten las fuerzas de tensión y tienen baja resistencia a diferentes sustancias químicamente agresivas para la bentonita o asfalto.

### Principales Problemas de las Geomembranas en los Rellenos Sanitarios

Koerner et al 1990, menciona que a lo largo de su vida útil, las geomembranas tienen contacto con diferentes mecanismos que producen daños, los tipos de degradación más graves son la: *biológica, radiación ultravioleta y aplicación de calor, sustancias químicas y engrosamiento(hinchazón), extracción de sustancias y oxidación*, además de los afectación por *deslaminación y efectos sinérgicos*.

#### *Degradación Biológica*

Este fenómeno no ha sido ampliamente estudiado, pero se cree que: el peso de las resinas es muy alto para ser digerido por microorganismos, las dudas se centran en los aditivos, plastificantes, rellenos y demás sustancias.

#### *Degradación por Radiación Ultravioleta y Aplicación de Calor*

Afecta a las diferentes sustancias que conforman las geomembranas, el ataque se efectúa cuando la luz de mayor longitud de onda, entra en la estructura molecular del polímero y libera los radicales libres lo que ocasiona el corte del enlace primario del elemento principal del polímero, traduciéndose en la *reducción de las propiedades mecánicas*. La solución al problema radica en el uso del carbón negro aunque complicaciones estructurales. Actualmente, se utilizan estabilizantes y absorbentes químicos activos por períodos de tiempo. Por esto, se recomienda proteger la geomembrana con al menos 10 cm de algún suelo.

Por otra parte, la aplicación excesiva de calor, puede provocar el debilitamiento y deformación de la geomembrana debido a los cambios microestructurales originados por la entrada de la energía térmica al sistema.

### *Degradación por Sustancias Químicas y Engrosamiento*

Se presenta cuando la geomembrana entra en contacto con alguna sustancia química, la cual al ser absorbida genera cambios en las propiedades físicas y mecánicas (problemas en la elongación y ruptura rápida). Por lo anterior, se debe evitar dañar las secciones de traslape donde se localiza el enlace y sellar las zonas que se aprecien dañadas .

### *Degradación por Extracción de Sustancias*

Aparece cuando el plastificante, relleno o alguna otra sustancia que se utiliza como parte de la estructura de la capa impermeable, pierde sus propiedades al entrar en contacto con las sustancias presentes en el relleno, esto se traduce en afectación a las propiedades mecánicas.

### *Degradación por Oxidación*

En este caso el problema radica en el oxígeno que tiene contacto con la geomembrana, la liberación de los radicales en la estructura ocasiona ruptura en la cadena principal. Para solucionar el problema, se utilizan antioxidantes que varían en propiedades y cantidad para cada tipo de capa impermeable.

### *Daño por Deslaminación*

La deslaminación se presenta cuando las sustancias entran por el borde de la geomembrana y llegan hasta el tejido o cubierta de refuerzo, ocasionando la separación individual de los componentes.

### *Daño por Efectos Sinérgicos*

Se define de esa forma a la combinación de algunos de los conceptos anteriores que aceleran los procesos de degradación.

### *Espesor de la Geomembrana*

El aumento de las propiedades mecánicas está en relación directa con el incremento del espesor de la geomembrana; los siguientes son factores que influyen en la selección del grosor : esfuerzos transmitidos por equipos pesados, características físicas de los residuos, irregularidad de la superficie de colocación, constante exposición a condiciones atmosféricas (rayos ultravioleta, ozono, temperaturas extremas, hielo y viento), vandalismo y accidentes por colocación. Para proteger la capa impermeable, es necesario nivelar el terreno, colocar una barrera natural o artificial de filtración y otra de soporte (suelo y geosintético) para proporcionar un área de trabajo limpia y estable. Lo anterior se traduce en repartición homogénea de las cargas, adecuada interacción entre el suelo y la geomembrana. Se previene la excesiva tensión por taludes y anclajes y se facilita la extracción del agua que generada por los aumentos de los niveles freáticos.

La Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos recomiendan espesores no menores a 1.5 mm (60mils) en aplicaciones para rellenos sanitarios (pueden existir variaciones dependiendo de los acuerdos con los Estados y las Tribus), la Comunidad Económica Europea recomienda espesores de 2.00 (80 mils) a 3.00mm (120 mils). En México se establece mediante los *diseños aprobados* establecidos por la SEMARNAP. Sin embargo, es oportuno mencionar que existe una base teórica para determinar un espesor adecuado, el desarrollo se logra considerando la *figura4.2* .

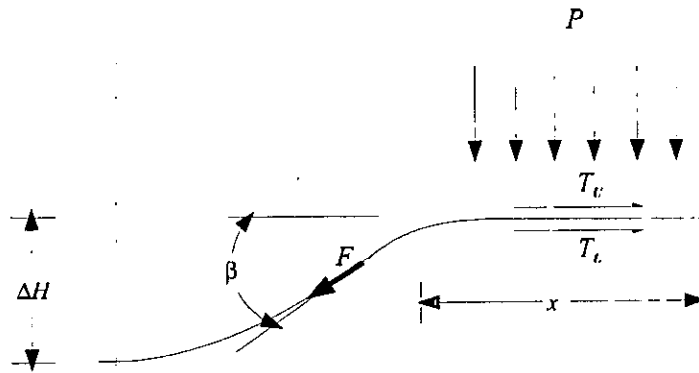


Figura 4.2. Determinación del espesor de la geomembrana.

La figura anterior plantea una suma con respecto al eje  $x$  con lo cual se obtiene:

$$\sum F_x = 0$$

entonces:

$$F \cos \beta = T_u + T_l$$

$$(\sigma \text{ permisible } t) \cos \beta = (p \tan \delta_u + p \tan \delta_l) x$$

se obtiene el espesor:

$$t = \left( \frac{p \times x}{\sigma \text{ permisible} \times \cos \beta} \right) = \tan \delta_u + \tan \delta_l$$

donde,

$\Delta H$  = desarrollo de esfuerzo debido al movimiento,

$F$  = fuerza en la capa ( $\sigma$  permisible),

$\sigma$  permisible = esfuerzo permisible en la capa,

$T_u$  = fuerza cortante sobre la geomembrana,

$T_l$  = fuerza cortante bajo la capa,

$T$  =  $p \tan \delta$ ,

$p$  = presión aplicada por el relleno,

$\delta$  = ángulo de resistencia cortante entre la capa y el material adyacente, y

$x$  = distancia de deformación por el movimiento de lienzo.

Los valores son proporcionados por las especificaciones de los diferentes tipos de geomembranas. La presión aplicada por el relleno se obtiene con pruebas experimentales en laboratorio u observaciones en campo.



### 4.3.3. Interacción de las Geomembranas con Suelos y Geosintéticos

Es propiedad que ha sido adaptada de las técnicas geotécnicas, su utilidad es evaluar la fricción que se genera entre los diferentes componentes del sistema impermeable. La interacción *geomembrana a suelo* es menor que la de *suelo a suelo*, en las de *geotextil a geomembrana* y *geotextil a suelo* los valores son variables y dependen de la forma del hilado que se haya utilizado para fabricarlos. Los valores de fricción son importantes debido al posible deslizamiento del suelo en el talud y en el sistema de anclaje.

Koerner (1986), presentó una serie de *valores y eficiencias de fricción* entre los materiales (tablas 4.3, 4.4 y 4.5) mencionados, abajo se muestran los datos de más interés de ese estudio.

Tipo de Geomembrana	Tipo de Suelo		
	<i>Arena para Concreto</i> ( $\phi=30^\circ$ )	<i>Arena Tipo Ottawa</i> ( $\phi=28^\circ$ )	<i>Arena de Esquisto</i> ( $\phi=26^\circ$ )
EPDM	24° (0.77)	20° (0.68)	24° (0.91)
CSPE	25° (0.81)	21° (0.72)	23° (0.87)
HDPE	18° (0.56)	18° (0.61)	17° (0.63)

Tabla 4.3. Ángulo de fricción entre geomembrana y suelo

Tipo de Geotextil	Tipo de Geomembrana		
	EPDM	CSPE	HDPE
<i>Cosido perforado, no entrelazado</i>	23°	15°	8°
<i>Enlace fundido, no entrelazado</i>	18°	21°	11°
<i>Monofilamento, entrelazado</i>	17°	9°	6°
<i>Película en corte, entrelazado</i>	21°	13°	10°

Tabla 4.4. Ángulo de fricción entre geotextil y geomembrana

Tipo de Geotextil	Tipo de Suelo		
	Arena para Concreto ( $\phi=30^\circ$ )	Arena Tipo Ottawa ( $\phi=28^\circ$ )	Arena de Esquisto ( $\phi=26^\circ$ )
Cosido perforado, no entrelazado	30° (1.0)	26° (0.92)	25° (0.96)
Enlace fundido, no entrelazado	26° (0.84)	-	-
Monofilamento, entrelazado	26° (0.84)	-	-
Película en corte, entrelazado	24° (0.77)	24° (0.84)	23° (0.87)

Tabla 4.5. Ángulo de fricción entre geotextil y suelo

La eficiencia de los componentes de fricción y cohesivos se obtienen con fórmula siguiente:

$$E\phi = \frac{\tan \delta}{\tan \phi}$$

y

$$E_c = \frac{Ca}{c}$$

donde,

- $E\phi$  = eficiencia del componente de fricción,
- $\delta$  = ángulo de fricción de la geomembrana a suelo,
- $\phi$  = ángulo de fricción de suelo a suelo,
- $E_c$  = eficiencia del componente cohesivo,
- $Ca$  = adhesión de la geomembrana a suelo y
- $c$  = cohesión del suelo al suelo.

#### 4.3.4. Anclaje de las Geomembranas

El proceso de colocación de la geomembrana involucra el anclaje de ésta. El empotramiento o hincado se realiza en una zanja localizada en la sección perimetral del sitio de disposición, la cual es cubierta con algún tipo de suelo generalmente impermeable.

Los análisis más importantes que se han realizado se refieren a la fuerza de tensión que soporta y la distancia de colocación de la zanja.

Para determinar las incógnitas planteadas, es necesario analizar la figura 4.3 y establecer un sistema de ecuaciones con respecto al eje x.

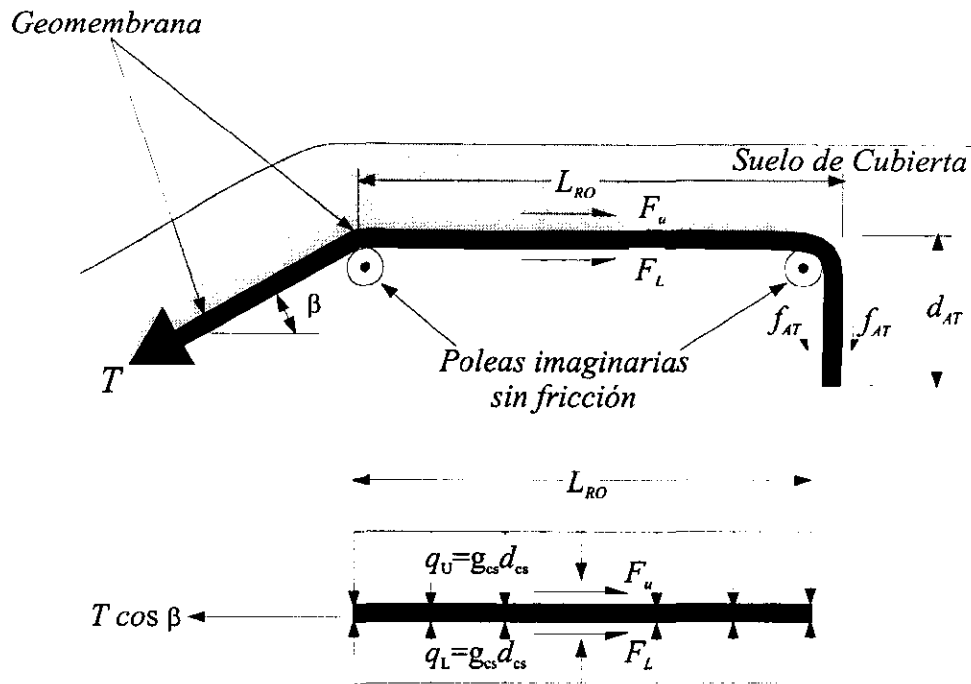


Figura 4.3. Esfuerzos en el anclaje

La solución al sistema de fuerzas es la ecuación que se muestra abajo:

$$T_{\text{permisible}} = F_U + F_L + 2F_{AT}$$

en donde,

- $T_{\text{permisible}}$  =  $\sigma_{\text{permisible}} t$ , el cual
- $\sigma_{\text{permisible}}$  = esfuerzo permisible en la geomembrana =  $\sigma_{\text{último}} / FS$ ,
- $\sigma_{\text{último}}$  = esfuerzo último de la geomembrana (falla),
- $FS$  = factor de seguridad, y
- $t$  = espesor de la capa impermeable,
- $F_U$  = fuerza de fricción abajo de la geomembrana
- $F_L$  =  $q \tan \delta (L_{RO})$ , en el cual
- $q$  = presión de la sobrecarga  $d_{cs} \gamma_{cs}$
- $d_{cs}$  = altura del suelo de cubierta
- $\gamma_{cs}$  = peso unitario del suelo de cubierta,
- $\delta$  = ángulo de fricción entre la geomembrana y el suelo,
- $L_{RO}$  = distancia para colocar la zanja de hincado( desconocida),
- $F_{AT}$  =  $(\sigma_h)_{AVE} \tan \delta (d_{AT})$ , en el cual,
- $\sigma_h$  = esfuerzo horizontal en porcentaje en la trinchera de anclaje =  $K_0 \sigma_v$
- $\sigma_v$  =  $\gamma H_{AVE}$
- $\gamma$  = peso unitario del suelo de relleno
- $H_{AVE}$  = porcentaje de profundidad del anclaje en la trinchera (se requiere estimar),
- $K_0$  =  $1 - \text{sen } \phi$ ,
- $\phi$  = es el ángulo de resistencia cortante del suelo de relleno, y
- $d_{AT}$  = (desconocida) profundidad de la zanja de anclaje

El diseño óptimo cumplirá con el factor de seguridad que haya sido establecido por la institución responsable.

#### 4.3.5. Sistemas para Unión de Geomembranas

Existen diferentes tipos de enlace para las geomembranas, los más utilizados en el campo son los de extrusión en cinta y uniforme, cuña, aire caliente, fusión y adhesión química, el objetivo principal del enlace es asegurar la impermeabilidad y resistencia de la zona de unión de los dos lienzos.

Es importante recordar que, la selección inadecuada del material para el enlace, disminuye considerablemente la posibilidad de que todo el sistema funcione correctamente. Es por eso, que se recomienda la aplicación de sistemas de aseguramiento y control de calidad en esta etapa del proyecto.

Para seleccionar el sistema de enlace. Se aconseja analizar las características de los materiales de fabricación de la geomembrana, de esta forma es posible entender porque los diferentes sistemas son o no aplicables, las variaciones en el uso se muestran en la tabla 4.6, en donde la letra A indica que el criterio es aplicable y la N la situación contraria.

Tipo de Unión	Tipo de Geomembrana								
	CPE	CPE-R	CSPE	CSPE-R	EIA	HDPE	PVC	PVC-R	VLDPE
Extrusión en Cintas o Tiras	N	N	N	N	A	N	N	N	A
Extrusión en forma Uniforme	N	N	N	N	A	N	N	N	A
Aire Caliente	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Cuña	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Fusión Química	A	A	A	A	A	A	N	A	N
Adhesión Química	A	A	A	A	A	A	N	A	N

Tabla 4.6. Sistemas de enlace para los diferentes tipos de geomembrana.

La metodología para definir la realización de todos los tipos de uniones en campo coinciden en la preparación de la geomembrana y el sistema general de control de calidad.

La información que se presenta ha sido obtenida del Technical Guidance Document: Inspection Techniques for the Fabrication of Geomembrane Fields Seams publicado por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos en 1991.

#### 4.3.6. Preparación de las Geomembranas en Campo.

Antes de colocar las geomembranas, es necesario realizar una revisión y preparación de esta al llegar al campo e indicar las actividades a realizar antes de trabajar en el sistema de enlace, por lo que se aconseja:

- ◆ Asegurarse que no haya sufrido daños durante la transportación. Se recomienda no desenrollarla y protegerla de la humedad si la temperatura es menor a  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  para evitar problemas de agrietamiento, revisar las especificaciones a detalle para cambios severos de temperatura en los diferentes tipos de capas impermeables.
- ◆ Que las geomembranas que se enlazarán se traslaparán de 7.5 a 15 cm. Si el traslape es excesivo, consultar sobre el tipo de herramienta a utilizar y la técnica de corte para las zonas sobrantes;
- ◆ Que el personal que trabaje sobre los lienzos, utilice zapatos lisos y no se permitirá el uso de equipos pesados sobre esta, a menos que el sistema de control de calidad lo permita.
- ◆ Evitar la fricción excesiva de la capa con el suelo, principalmente en superficies muy rugosas por el posible desarrollo de secciones de falla.
- ◆ Que la longitud de las secciones a unir sean mayor a 15 m, para garantizar el menor número de interrupciones posibles.
- ◆ Establecer una constante revisión visual en las secciones de unión.
- ◆ Que si para el proyecto es conveniente, especificar detalladamente las distancias a traslapar.
- ◆ Evitar las ondulaciones de los lienzos durante el proceso de unión que se presentan por la variación térmica en las capas o por que una tiene menos tensión que la otra. Esto se soluciona revisando las características de control de calidad para la expansión y contracción de cada lienzo.
- ◆ Que la parte a traslapar esté limpia y seca, realizar la operación con tela o estopa seca o utilizar secadores de aire (no aplicar temperaturas altas).
- ◆ Que no se permita la construcción del enlace durante condiciones de lluvia, nieve, o suelo saturado o congelado, a menos que se demuestre que es posible realizar la unión con la calidad requerida. En caso de efectuar el enlace en condiciones a muy baja temperatura, se aconseja emplear los sistemas de aire caliente sobre la capa para calentarla y hacer más eficiente la colocación de la soldadura o sustancia química.
- ◆ En condiciones de altas temperaturas el problema se presenta en el rendimiento de la brigada y en algunos tipos de geomembranas, en este último caso, se recomienda realizar pruebas no destructivas en los enlaces para verificar el funcionamiento.

#### 4.3.7. Proceso General de Control de Calidad en Campo.

El Aseguramiento y Control de la Calidad garantizan un mínimo de fugas en el sistema impermeable. McBean(1995) señala que son valores aceptables para este tipo de sistema los siguientes datos:

- ◆ para la zona de enlace 1 defecto cada 300 m.
- ◆ para el área total colocada 1 perforación cada 4000 m<sup>2</sup>.

El costo por el desarrollo o aplicación de éste tipo de sistemas en los Estados Unidos y Canadá es de aproximadamente del 7 al 12% del costo por la compra e instalación de la geomembrana dependiendo del tipo de sistema.

El proceso de aseguramiento y control procesos garantiza la calidad en los sistemas de junta en campo, señaladas en las especificaciones de los contratos que estipulan una mínima cantidad de pruebas practicadas al sistema de juntas (destructivas y no destructivas).

Al practicarse las pruebas destructivas, los cortes de que varían de 1.5 a 4.5m por 0.50m y abarcarán la sección de unión. Las revisiones indican las propiedades de los materiales bajo condiciones climáticas variables. Por otra parte, la necesidad de supervisar la colocación hace necesario que cada cuadrilla registre los lugares donde realiza las juntas de los lienzos, así como las herramientas empleadas. Las pruebas se efectúan generalmente cada 4 horas. Es decir, cuando hay cambio de equipo, variaciones perceptibles en la temperatura ambiental o cuando el contrato especifique alguna condición de interés.

El control de calidad que se exige se efectúa similarmente para todos los sistemas de juntas y se especifican en el contrato. El análisis de las muestras tomadas se encarga al representante de aseguramiento de la calidad que después de practicar las pruebas pertinentes establece si el sistema de unión está o no funcionando adecuadamente; en caso negativo es necesario destruir las zonas que tienen deficiencias y detener el trabajo que se está realizando, lo anterior se presenta en la figura 4.4.

Es importante señalar que existen varios equipos para realizar las pruebas de control de calidad, el más utilizado es el de la caja de vacío.

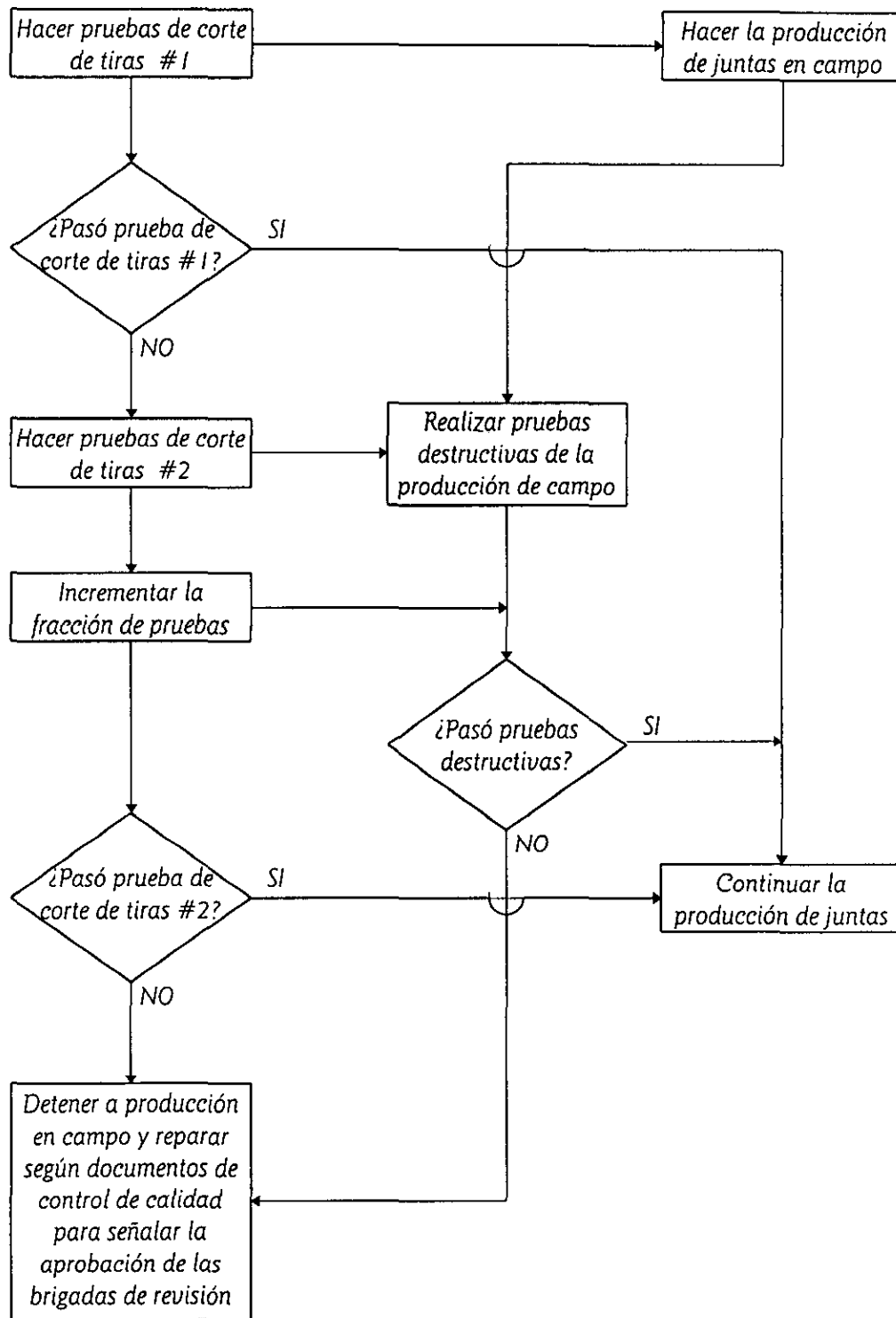


Figura 4.4. Diagrama de flujo para el control de calidad en campo.

### Aseguramiento del Control de Calidad en Campo

Giround y Peggs (1990), señalan diferentes puntos para el aseguramiento y congruencia del control de calidad en campo, estos son:

- ◆ Revisar diseños y croquis para identificar plenamente el proyecto.
  - ◆ Revisar la topografía para establecer si el sitio es consistente con la forma y el sistema de colocación.
  - ◆ Revisar que se tenga el terraplén necesario para la instalación del enlace de los lienzos.
  - ◆ Evaluar y documentar las condiciones climáticas existentes, y obtener la aprobación del representante del dueño para iniciar el trabajo, en caso de conseguir la autorización registrar los lienzos colocados.
  - ◆ Elaborar un croquis donde se indique donde se ha instalado cada lienzo y el número de registro que se tiene.
  - ◆ Revisar especificaciones del proyecto para indagar sobre trabajos realizados anteriormente y fundamentar la experiencia.
  - ◆ Revisar constantemente la construcción del sistema, anotar comentarios y observaciones.
  - ◆ Establecer la forma y reparto de los rollos de las geomembranas.
  - ◆ Revisar el manejo y almacenamiento de los lienzos.
  - ◆ Registrar el número de paneles y los lugares donde se extendieron y colocaron
  - ◆ Seleccionar aleatoriamente los rollos de los cuales se obtendrán las muestras.
  - ◆ Fijar un número de código a las muestras y anotar los números de registro de los lienzos y sus especificaciones.
  - ◆ Etiquetar, empaquetar y enviar las muestras a dos laboratorios.
  - ◆ El laboratorio interpretará las pruebas considerando las especificaciones; para aceptarlas o rechazarlas.
  - ◆ Registrar las brigadas, así como la marca y número de serie de los equipos con los que se efectuaron los trabajos, practicar pruebas no destructivas de forma aleatoria a las secciones de enlace.
  - ◆ Cuando se realicen pruebas no destructivas, verificar que estas no hayan dañado al sistema de enlace.
  - ◆ Practicar pruebas no destructivas en las secciones donde se sospeche que habrá problemas.
  - ◆ Fijar un número de código a las diferentes secciones que se hayan unido. Anotar el nombre del empleado, la máquina utilizada, el tiempo empleado para realizar el enlace, la temperatura del equipo y la del ambiente.
-



- ◆ Realizar el monitoreo y documentar las pruebas no destructivas que se hayan practicado.
- ◆ Cuando se requiera extraer muestras para las pruebas destructivas, señalar y describir el sitio, anotar condiciones climáticas, tipo de navaja con que se realizó el corte y el nombre del responsable.
- ◆ Después de extraerse la muestra, esta se dividirá en tres partes para que sean analizadas por dos laboratorios diferentes, la tercera se mantendrá en poder del contratista y se utilizará para desempatar la prueba en caso de que los laboratorios presenten resultados diferentes.
- ◆ Revisar y documentar el parchado de las zonas donde se hayan realizado los cortes para las muestras de las pruebas destructivas, posteriormente practicar pruebas no destructivas en la zona.
- ◆ Analizar y documentar las zonas de cosido que no superaron las pruebas no destructivas y parcharlas.
- ◆ Revisar la superficie de la geomembrana para detectar daños y repararlos.
- ◆ Localizar en un plano los lugares donde se hayan presentado daños, indicar cuales han sido reparados.

El reporte final del aseguramiento del control de calidad para las geomembranas debe incluir:

- ◆ Una breve descripción del proyecto que indique todos los pasos que se realizaron para efectuar el trabajo, nombre del sitio, localización, altitud, nombre del dueño, ingeniero diseñador, instalador de la geomembrana y contratista.
- ◆ Una detallada descripción del lugar donde se instaló la geomembrana, área total, sección transversal y definición de todos los materiales y equipos utilizados.
- ◆ Copia de las especificaciones de la geomembrana.
- ◆ Copia y referencias de la documentación de control de calidad.
- ◆ Registro general de actividades con datos y fechas del aseguramiento de control de calidad, operaciones efectuadas, nombre y número de quién realizó los monitores.
- ◆ Memoria fotográfica que incluya diferentes fases de construcción y detalles importantes.
- ◆ Copias de los formatos con información completa de las pruebas de campo y laboratorio que se han practicado.
- ◆ Discusión de los problemas encontrados y las soluciones dadas a cada uno.
- ◆ Registro del aseguramiento de calidad que indique el código de los números del panel y del material o equipo utilizado para el enlace, fechas de cosido y reparaciones, ubicación y naturaleza de todas las reparaciones, ubicación de las zonas donde se extrajeron las muestras para las pruebas destructivas y la fecha en que se realizó el trabajo.
- ◆ Registros y dibujos donde se muestren los detalles que son diferentes a los propuestos en el diseño.
- ◆ Una declaración final donde el dueño está de acuerdo con el trabajo que se ha desarrollado.

#### 4.4. Tipos de Enlaces

##### Unión por Proceso de Extrusión.

Este método se emplea en todos los tipos de geomembranas de polietileno, colocando cintas de soldadura o extrusión sobre los bordes o entre las superficies que se han de unir (figura 4.5); las dos técnicas de este tipo son la de tiras o cintas y la uniforme.

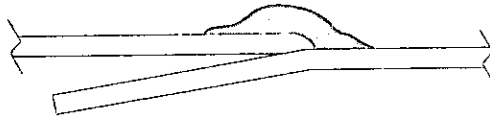


Figura 4.5. Enlace mediante tira de extrusión

##### Extrusión en Tiras o Cintas

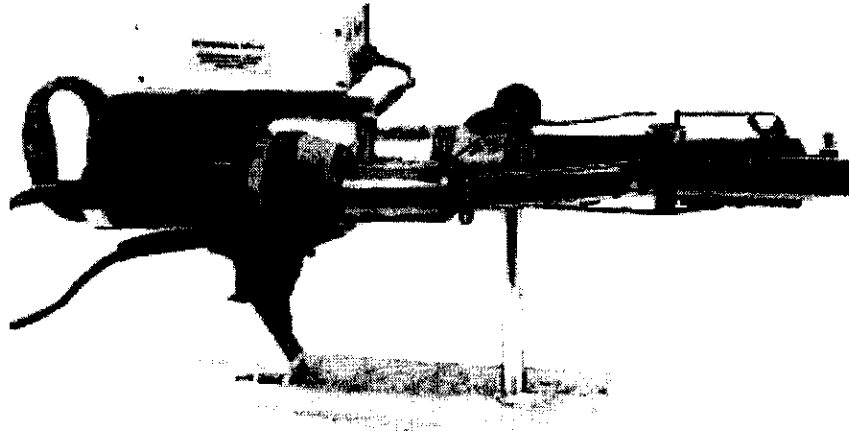
El equipo se conduce sobre el borde de la junta para unir los lienzos. El equipo y su uso así como la descripción del proceso se muestran a continuación. El rendimiento alcanzado para estos sistemas varía de 0.30 a 2.00 m/min.

##### Equipo

En esta etapa los equipos que se emplean son el generador de energía, el esmeril con tallador de 10cm (cuya función es tallar las zonas donde se colocaran las tiras), y el dispositivos de aire caliente para la extrusión; el procedimiento a seguir es:

- ◆ Especificar las características técnicas del generador de energía (energía producida y su transmisión, combustible, uso de llantas de hule, que tengan estabilidad), así como los lugares de almacenamiento del combustible.
- ◆ Señalar las características de los talladores eléctricos (esmeriles) a emplear, especificando el diámetro, aspereza y velocidad requerida.
- ◆ Especificar las características y especificaciones del dispositivo (manual o automático) de inyección de extrusión mediante aire caliente para evitar daño a la geomembrana, y en el campo señalar la posición y dirección que seguirá.
- ◆ Revisar que todos los sistemas tengan indicadores de temperatura y que funcionen adecuadamente, el equipo se someterá a una revisión periódica.
- ◆ Revisar las especificaciones de correspondencia entre la forma y tamaño de la soldadura y el espesor de la geomembrana para seleccionar el equipo con las características adecuadas.
- ◆ Elegir resinas similares a las que contiene la geomembrana para que el proceso de unión se logre correctamente, además señalar el tipo de rodillo para realizar el proceso así como su limpieza periódica.

En la *figura 4.6*, se muestra uno de los diferentes modelos que se emplean para realizar esta tarea; la mayoría de estos presentan boquillas intercambiables de varias medidas para garantizar la correcta colocación de las tiras de extrusión; estas pasan por una de las aberturas y posteriormente se les aplican altas temperaturas para lograr el enlace.



*Figura 4.6. Pistola para cintas de extrusión*

#### Procedimiento de Unión

El efectuar la unión de los lienzos implica el realizar los siguientes puntos:

- ◆ Colocar los lienzos para establecer las direcciones de enlace y el traslapar 75 mm el lienzo inferior con respecto al superior.
- ◆ Revisar el espesor de la geomembrana. Si este es igual o mayor a 1.5 mm (60mils), entonces el borde del lienzo superior debe ser tallado (sin dañar el inferior) hasta lograr un ángulo de 45°.
- ◆ Pulir con el dispositivo adecuado (esmeril con disco de 10 cm) la superficie biselada y a partir de la mitad de esta, hacia los dos lienzos (superior e inferior) realizar el mismo procedimiento hasta alcanzar 25 mm en cada sentido; el tallado se realizará en sentido perpendicular al sentido en que se colocará la sustancia de extrusión para evitar el surgimiento de grietas en la misma dirección.
- ◆ La superficie pulida, tendrá una profundidad del 5 al 10% del espesor de la capa para eliminar la superficie encerada, oxidada y rugosa; en caso de excederse, desechar la superficie.
- ◆ Después de la limpieza de la zona pulida, la sustancia de unión se debe colocar antes de 10 minutos sobre la superficie limpia para evitar la oxidación y el polvo.
- ◆ Antes de usarse por primera vez el aparato de extrusión se ha de purgar. Se aconseja realizar algunas pruebas para observar la distribución de la sustancia, cuando se apague por más de dos minutos y nuevamente se encienda se realizará el primer paso.
- ◆ Es recomendable revisar que los indicadores de temperatura estén funcionando adecuadamente lo que tiene que ser verificado con otro dispositivo que mida las temperatura de salida y de contacto en la capa.

- ◆ El fluido viscoso del proceso de extrusión se deposita sobre la parte pulida de las dos capas impermeables, hasta cubrir el ancho que fue pulido.
- ◆ El espesor que tendrá la sustancia, será igual o mayor al de la geomembrana y se colocará lo más uniforme y continua posible; de no ser así, se rechazará la junta ya que la no uniformidad está asociada a la falta de temperatura o a la lenta realización del proceso.
- ◆ En caso de que se interrumpa el proceso, la sustancia tendrá una apariencia uniforme y no abultada como en las soldadura convencional. Posteriormente, al reiniciar la operación, la zona deberá estar fría, tallada y limpia y se aplicará sobre la sustancia anterior.
- ◆ Ya que pasó un tiempo de la colocación del enlace. Revisar en lo posible si en la parte inferior del lienzo aparecieron pliegue u ondulaciones.

#### Revisión

Es recomendable evitar que generen altas temperaturas sobre las capas (se recomienda colocar alguna base aislante donde se ponga encima este). Revisar que no haya gotas de sustancia extrusiva o daños sobre la capa. Observar que la extrusión tenga textura uniforme que esté alineada y con espesor suficiente. Si hay burbujas o picaduras se puede deber a la presencia de humedad, polvo o pequeños trozos de polímero, en este caso se debe parchar la zona con tiras de geomembrana que excedan en 15 cm cada lado de la parte dañada.

#### Extrusión Uniforme

Se le llama así porque el enlace se localiza entre los dos lienzos (figura 4.7). Éste método también se emplea para parchar geomembranas. El rendimiento varía de 0.30 a 2.00m/min.

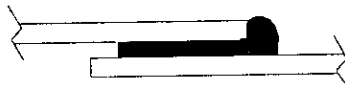


Figura 4.7. Traslape de extrusión

#### Equipo

Se especifican los equipos del sistema anterior y se adiciona el sistema automático que genera altas temperaturas y la presión necesaria para unir lienzos (figura 4.8).

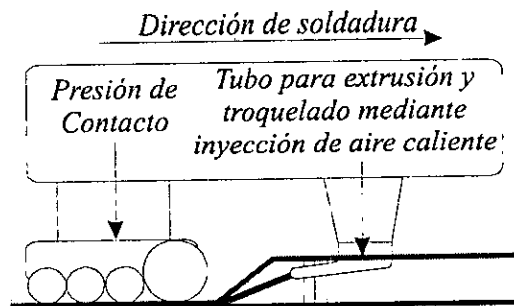


Figura 4.8. Soldadura de extrusión para unión en el sitio

### Procedimiento

La metodología para realizar este proceso se muestra en el siguiente orden:

- ◆ Para la limpieza de la superficie existen las siguientes alternativas: pulir la superficie de los dos lienzos, en la inferior se pule un ancho de 5 a 7.5 cm y en el superior la cara que contacta el inferior se levanta y se pule con el mismo ancho y en una longitud determinada. Utilizar el sistema de aire caliente (manual o automático) a una temperatura constante y revisar la aplicación del calor en la sección de unión. Si se opta por el cepillado se recomienda no profundizar más del 10% del espesor respetar anchos y longitudes .
- ◆ Preparar en lo posible que las direcciones para el enlace sean rectas para lograr rendimientos adecuados por el avance diario.
- ◆ Es necesario recordar la necesidad de purgar el equipo cuando se encienda al iniciar actividades y si se apaga más de dos minutos.
- ◆ Seleccionar adecuadamente el tamaño de la boquilla que permita grosor, ancho, uniformidad y velocidad en la colocación de la sustancia.
- ◆ Después de colocada la extrusión se revisará el estado del traslape. La sustancia debe ser suficiente y uniforme y además no presentar indicios de contaminación por polvo o humedad. Si se tienen dudas, aplicar en la sección alguna prueba no destructiva de control de calidad.
- ◆ Revisar que los rodillos tengan una superficie plana y uniforme, la presión óptima se obtiene considerando los espesores de los lienzos.
- ◆ Mantener los aparatos que generan el calor para la extrusión a las temperaturas especificadas, registrarlas en una bitácora y realizar ajustes si se presentan variaciones en las temperaturas con la intención de verificar las especificaciones de calidad.

### Revisión

Observar que los equipos que generan calor lejos de los lienzos, desconectado y sobre una superficie aislante, inspeccionar que los tallados hayan sido cubiertos por la el fluido extrusivo y que no se tengan acumuladas grandes cantidades de este. Registrar las zonas donde exista duda sobre la calidad de la junta para efectuar las pruebas con la caja de vacío y establecer el procedimiento a seguir, localizar zonas con perforaciones e irregularidades y parcharlas.

### Unión mediante Cuña

El aparato principal de este sistema consiste en una resistencia eléctrica en forma de cuña que genera altas temperaturas y que al tocar las dos geomembranas funde la superficie de contacto, a continuación son unidas por un sistema de rodillos, existe la posibilidad de que el enlace se realice de forma sencilla (*figura 4.9.*)o doble (*figura 4.10.*). El rendimiento varía de 1.00 a 4.00m/min o menores dependiendo de las condiciones climatológicas.

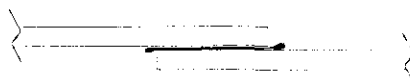


Figura 4.9. Fusión de pista simple

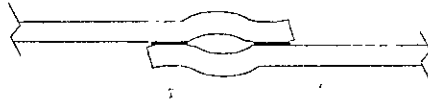


Figura 4.10 Fusión de doble pista

### Equipo

Es necesario utilizar los equipos de generación de energía eléctrica. La figura 4.11 muestra el sistema de cuña sencilla o doble (la cuña mide 25mm en la base, 75 de altura y de 25 a 75 en la longitud de la superficie de contacto), el sistema se compone de rodillos, sistema de engranaje para la velocidad y colocación del lienzo, la selección de este depende del tipo de geomembrana, espesor, temperatura ambiental y velocidad de colocación.

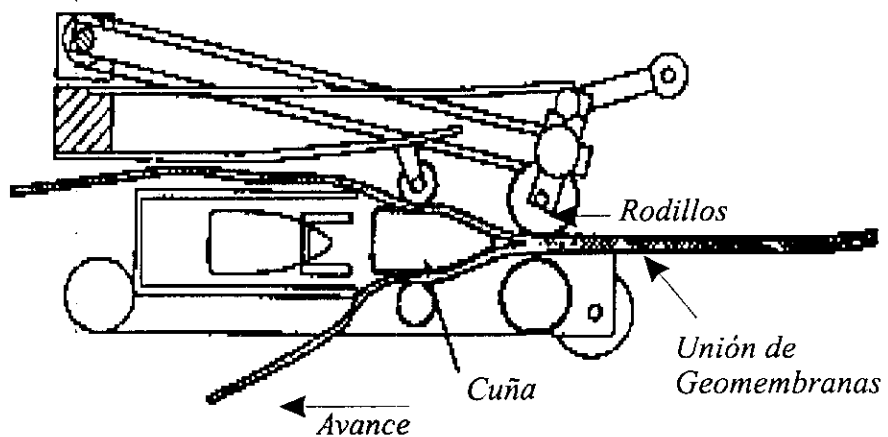
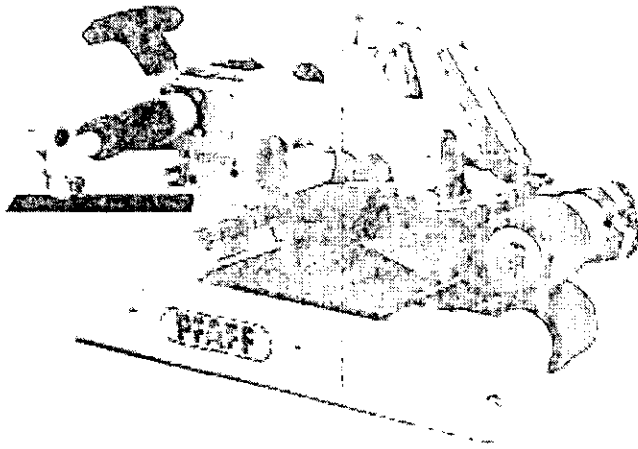


Figura 4.11 Cuña de enlace.

Verificar que la superficie de enlace se encuentre limpia (*no tallada*), que la forma de la cuña esté liso y sin partes filosas, y en caso de ser dual, revisar la separación especificada y que los rodillos sean uniformes, lisos y biselados en los bordes y generen la presión suficiente. Observar que el sistema de avance correctamente ya que pueden dañarse los lienzos al quedar atrapados .

Los rangos de temperatura que debe alcanzar cuña para que se efectúe el enlace se presentan en la *tabla 4.7*.

Tipo de Geomembrana	Temperatura Mínima* (°C)	Temperatura máxima** (°C)
CPE	170	370
CPE-R	170	370
CSPE-R	180	370
EIA	155	175
EIA-R	155	175
HDPE***	315	455
PVC	165	370
PVC-R	165	370
VLDPE***	270	400

*Tabla 4.7 Rango de temperaturas para el enlace mediante cuña.*

\*En temperaturas altas y sin humedad

\*\*En clima frío y condiciones de humedad

\*\*\*Para lienzos rugosos se requiere incrementar en 25°C la temperatura, disminuir la velocidad para la unión e incrementar la presión.

#### Procedimiento

El funcionamiento de este sistema inicia cuando los lienzos pasan a través de la máquina. La parte seleccionada (previamente limpia) entra en contacto con la cuña que el calor necesario para derretir un espesor especificado en la superficie ( de un 5 al 10 %). Posteriormente, los lienzos llegan al sistema de rodillos que transmiten la presión necesaria para que las capas formen la unión.

Los puntos de importancia para el sistema de enlace son:

- ◆ Establecer la temperatura necesaria para que obtenga la fundición del espesor especificado.
- ◆ Determinar la presión necesaria de los rodillos para realizar la junta y revisar los indicadores de presión para verificar correcto funcionamiento.
- ◆ Especificar la velocidad a la que el equipo tiene que moverse para realizar la unión de manera eficiente y observar la uniformidad de las juntas. En caso de que el fluido derretido fuera de la sección de traslape, se interpretará como: presión excesiva, alta temperatura o lenta velocidad del equipo.

- ◆ Ajustar la temperatura del equipo ante los cambios climáticos y mantenerla constante. Revisar las juntas que se obtienen en estas condiciones y si es posible realizar pruebas destructivas y no destructivas con muestras seleccionadas.
- ◆ Revisar continuamente los indicadores de temperatura y la presión aplicada y las marcas que dejan en la geomembrana, ya que en algunos casos se crean ranuras por la presión excesiva.
- ◆ Seguir las especificaciones cuando se tenga que reiniciar la junta en alguna zona.
- ◆ Evitar que el equipo se obstruya con alguna superficie irregular e incorpore residuos y polvo a su parte interna. Para esto, se requiere que la superficie sea plana y que se revise el tamaño de los rodillos y que trabajen dos personas por equipo.
- ◆ El número de operadores por equipo será de dos.

### Revisión

Ya que se han realizado las tareas de enlace, se tiene que observar que los equipos que generan altas temperaturas se mantengan sobre alguna bases aislante y lejos de la geomembrana, la calidad de las juntas y parchar las zonas que sean irregulares o tengan perforaciones y se proporcione mantenimiento y limpieza al equipo,

### Unión mediante Aire Caliente

El método de enlace con aire caliente se efectúa con un equipo que generará el aire a una temperatura controlada. Este se coloca en la parte seleccionada para el traslape, el calor del aire derrite la superficie y posteriormente se aplica la presión necesaria para unir los lienzos, este método puede producir uniones sencillas o duales.

### Equipo

El equipo se compone por un dispositivo en forma de resistencia que genera altas temperaturas y un sistema que genera y controla la velocidad del aire, que funde la superficie de la geomembrana.

Los equipos de aire caliente son de tipo manual y automático de aire o de algún tipo de gas, en caso de ser de este último tipo es necesario garantizar el suministro y el sitio para el almacenamiento.

Las recomendaciones generales para los dos tipos de equipos, incluyen: revisar que las boquillas no estén dañadas o rotas y que se genere la presión necesaria. Los señalamientos especializados dependen del tipo de equipo a operar.

### Equipo Manual

La figura 4.12, muestra el equipo manual de aire caliente, compuesto de una pistola de aire, un grupo de boquillas y un rodillo. Para el uso adecuado del equipo, se requiere medir la temperatura de salida con algún dispositivo para establecer su funcionamiento, aplicar correctamente el aire a presión en secciones indicadas y evitar generar zonas de baja presión ya que el polvo seguramente se moverá hacia las partes de la unión de los lienzos, evitando que se realice bien el enlace.



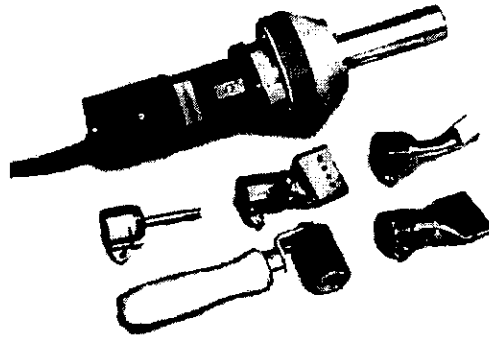


Figura 4.12. Equipo manual de aire caliente

#### Procedimiento

Establecer el valor del suministro de calor y la velocidad de aplicación en la geomembrana, colocar el aparato correctamente para que el aire caliente derrita la parte seleccionada en ambos lienzos; después, someter a presión el traslape para lograr la junta dependiendo del tipo y espesor de la capa; determinar los ajustes que se tienen que realizar por variaciones en el ambiente y revisar la calidad de las juntas conseguidas. Los principales indicadores de la baja eficiencia son la deformación superficial de las zonas de contacto entre los lienzos y la velocidad de avance. Se recomienda una cuadrilla de dos operadores para el manejo de aire y el rodillo respectivamente.

#### Equipo Automático

La figura 4.13, muestra el equipo automático las recomendaciones son: revisar que la temperatura y el flujo del aire sean constante, verificar que la trayectoria del equipo sea la indicada. Revisar que los rodillos sean planos, uniformes y proporcionen la presión requerida. Asegurarse que el equipo tenga llantas lisas de hule, verificar la sincronización del sistema de avance y verificar que se produzca adecuadamente el contacto para el sellado en el traslape.

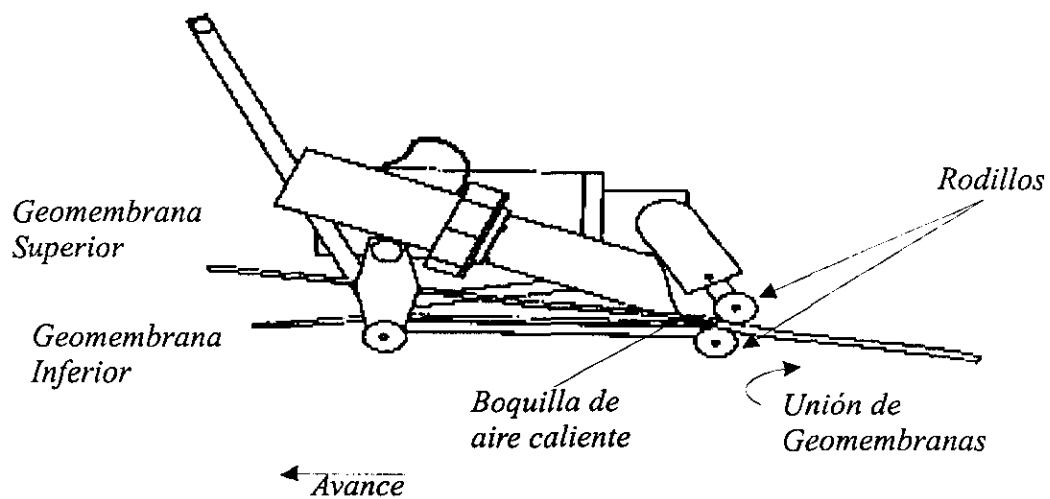


Figura 4.13. Equipo automático para enlace por aire caliente

Las temperaturas que el equipo requiere se presentan en la *tabla 4.8*.

<i>Tipo de Geomembrana</i>	<i>Temperatura Mínima (°C)</i>	<i>Temperatura Máxima (°C)</i>
CPE	245	650
CPE-R	245	650
CSPE-R	245	650
EIA	370	650
EIA-R	370	650
HDPE***	400	650
PVC	370	650
PVC-R	370	650
VLDPE***	350	650

*Tabla 4.8 Rango de temperaturas para enlace utilizando aire caliente*

\*En temperaturas altas y sin humedad

\*\*En clima frío y condiciones de humedad

\*\*\*Para lienzos rugosos se requiere incrementar en 40°C la temperatura así como disminuir la velocidad para la unión e incrementar la presión.

#### Procedimiento

- ◆ Colocar el equipo (con sistema de pista simple o doble) en la posición entre los dos lienzos, programar la energía calorífica, la presión requerida y la velocidad de enlace se programan considerando las características de la geomembrana. Evaluar la necesidad de realizar ajustes evaluando las variaciones de temperatura.
- ◆ Al iniciar el proceso de junta, es necesario colocar los dos lienzos a la entrada del equipo para que derrita las superficies y pasen por la zona de presión. Cuando se tenga que reiniciar la operación, los lienzos y el equipo se levantarán unos centímetros, los lienzos se introducen hasta que se sujeten. Posteriormente se baja y se enciende el equipo para iniciar la aplicación del calor y avance el sistema.
- ◆ Revisar el ancho, el espesor y la uniformidad de las juntas que se estén realizando.
- ◆ Vigilar que al avanzar la máquina no excave e introduzca tierra al sistema. Es recomendable utilizar algunas partes de geomembranas o geotextiles en la base y revisar que el tamaño de las ruedas del equipo sea el adecuado.
- ◆ Revisar que los rodillos estén listos y proporcionen la presión especificada y que los indicadores de temperatura funcionen bien.

### Revisión

Al terminar la unión de los lienzos es necesario revisar que: el equipo de inyección de calor no se encuentre sobre los lienzos, que la calidad de las juntas sea la indicada en las especificaciones del contrato y del sistema de control de calidad y verificar que los rodillos no hayan dañado al lienzo. En caso de ser necesario, colocar parches cubriendo la perforación y dejando libre hacia cada lado de esta 15 cm.

### Unión mediante Sustancias que Producen Fusión Química

Se efectúa aplicando alguna sustancia química en forma líquida entre las dos capas de geomembranas, estas se ablandan y se unen ya que se encuentra en fase viscosa, a continuación se le aplica presión para que se establezca la unión.

### Equipo

- ◆ Conseguir en cantidad suficiente la sustancia que generan la fusión química para las características de la geomembrana y leer las instrucciones detalladamente.
- ◆ Colocar las sustancias sobre una base que no se dañe en caso de alguna fuga y resguardarlas del ambiente en un almacén donde no estén cerca de los lienzos.
- ◆ En caso de que algún recipiente que contenga la sustancia haya quedado abierto, éste ya no se usará como fusionante ni mezclará con otro.
- ◆ Usar brochas de 5 a 10 cm de longitud que tengan cerdas que sean inertes al fusionante.
- ◆ Determinar la cantidad de sustancia que se colocará en la junta y que se aplicará a la capa para evitar cantidades excesivas que dañen la capa.
- ◆ Tener en el lugar una cantidad suficiente de trapos y limpiadores para cuando sea necesario retirar cantidades excesivas del fusionante.
- ◆ Suministrar guantes que resistan el ataque del fusionante químico.
- ◆ Seleccionar el tipo de rodillo (acero, madera o hule) y su longitud que deben tener.
- ◆ A bajas temperaturas se requiere aplicar calor a las geomembranas con algún sistema de aire caliente antes de colocar el fusionante.

### Procedimiento

- ◆ Primeramente seleccionar el fusionante según la composición química de la geomembrana y recordar que el espesor máximo de fusión no debe exceder el 10% del espesor de la capa. Con esto, se logra una adherencia adecuada y no se presenta el fenómeno de hinchazón en la parte del lienzo en el que se coloca la sustancia. Finalmente poner los recipientes sobre alguna base inerte.
- ◆ Es recomendable realizar pruebas de unión con pedaceras antes de colocarlo en los lienzos, para observar el comportamiento del fusionante y la capa en las condiciones ambientales del lugar.

- ◆ Colocar la sustancia en el lienzo inferior en cantidad suficiente y en forma uniforme que permita que la unión se realice en forma correcta. Si se coloca una cantidad excesiva se tiene que limpiar antes que se dañe el lienzo (generalmente la fusión se empieza a lograr a los 5 segundos).
- ◆ Después de cumplirse el tiempo de fusión, es necesario aplicar con el rodillo una fuerza de presión paralela en la zona de contacto con el objetivo de remover bolsas de aire y exceso de fusionante, se deben dar de 5 a 10 pasadas a cada lado con una longitud recomendada de 60 cm.
- ◆ Desarrollar el traslape y verificar que la zona donde se colocará el fusionante esté completamente limpia, para esta tarea se pueden emplear trapos, brochas o cepillos con algún líquido que no afecte a la geomembrana.
- ◆ En caso de que dos brigadas trabajen en el mismo panel, éstas empezarán el enlace desde el centro y si fuera necesario colocar la geomembrana en una pendiente se recomienda trabajar en forma ascendente.
- ◆ Para realizar algún corte para el ajuste de lienzos se necesita utilizar navajas específicas según las características del material y colocar una sustancia protectora después del corte, para evitar que se que se dañe el hilado de la geomembrana.

#### Revisión

- ◆ Revisar el ancho, continuidad y uniformidad inmediatamente después de realizar la unión. En caso de ser necesario, se emplea el equipo de aire caliente para eliminar las bolsas de aire.
- ◆ Buscar zonas donde haga falta la sustancia y colocarla.
- ◆ Si se presenta algún derrame o daño permanente, se aconseja parchar la zona.
- ◆ Evitar colocar recipiente con fusionante sobre los lienzos.

#### Unión con Adhesivos Químicos

Este consiste en la colocación de una sustancia que actúa como un disolvente de enlaces (adherente) que se convierte en parte del sistema y realiza la unión de los dos lienzos, el adherente se impregna en las dos capas. Posteriormente, se aplica presión a la zona mediante un rodillo.

#### Equipo

- ◆ Elegir los tipos de adhesivos a usar según las características de las geomembranas y seleccionar un lugar para almacenar los recipientes con la sustancia.
- ◆ Seleccionar correctamente las brochas (las cerdas deben resistir el adhesivo). El ancho de la superficie de aplicación varía de 5 a 10 cm.
- ◆ Suministrar oportunamente la entrega de adhesivo y guantes para protección contra las características químicas del adhesivo.
- ◆ Si la sustancia del recipiente expuesta al ambiente no se mezclará ni utilizará posteriormente.
- ◆ Para una mejor distribución de la presión que se aplicará, se requiere usar tablas para distribuir uniformemente la presión de los rodillos.

- ◆ Los recipientes que se empleen en campo para la colocación de sustancias serán pequeños, manejables y no exceder en 1/3 de su capacidad, para evitar problemas de derrame.
- ◆ Disponibilidad y suficiencia de trapos y cepillos de cerdas suaves para quitar el exceso de adhesivo.
- ◆ Al aplicar la presión se pueden utilizar rodillos de acero, madera o plástico su longitud varía entre 5 y 9 cm.
- ◆ En caso de trabajar a bajas temperaturas, es recomendable inyectar aire caliente en la parte donde se aplicará en adhesivo.

#### Descripción de la Unión con Adhesivos

- ◆ Realizar varias pruebas con pedacería de lienzos para observar como se comporta el adhesivo en esas condiciones ambientales.
- ◆ Establecer el traslape adecuado según se especifique en el proyecto.
- ◆ Usar brochas y trapos para limpiar el polvo de las zonas donde se colocará el adhesivo.
- ◆ Revisar las especificaciones sobre la manera de proceder en caso de que sea necesario cortar una sección del lienzo.
- ◆ En caso de que dos brigadas realicen el pegado de dos lienzos, deberán empezar en el centro y terminar en los extremos si se está en una zona de talud o pendiente pronunciada, se recomienda proceder de manera ascendente.
- ◆ Revisar si falta adhesivo en alguna junta; si es así, proceder como en el caso de los fusionantes.
- ◆ Aplicar la presión con el rodillo pasando de 5 a 10 veces en cada dirección y considerando una longitud máxima de 60 cm.
- ◆ Establecer condiciones sobre la colocación de tablas (bajo y sobre los lienzos) para transmitir una presión uniforme.

#### Revisión

- ◆ Observar la uniformidad del enlace y los cambios que afectan la zona de contacto del adhesivo, aplicar algún tipo de prueba no destructivas (bomba de aire) para determinar secciones despegadas, posteriormente parchar la sección.
  - ◆ En caso de derrame de adhesivo o detección de perforación se tiene que parchar la zona dañada.
  - ◆ Colocar una superficie lisa bajo la geomembrana antes de realizar el enlace y la reparación.
-

#### 4.4.1. Fallas que Pueden Presentarse en la Geomembrana



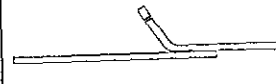

Las geomembranas son afectadas por diferentes tipos de fallas; Giround, et al 1990, indica que los tipos de fallas del polietileno de alta densidad (HDPE) pueden ocurrir por debilitamiento en las zonas vecinas al sistema de enlace, otras causas son el tallado profundo en dirección paralela al cosido (usado en algunos sistemas de enlace), deformaciones en la geomembrana ocasionadas por sobrecalentamiento del enlace, aplicación de tensión excesiva, daños en los bordes de los enlaces y desprendimiento de la película (en las reforzadas).

El problema de las fallas se incrementa si no se toman en cuenta los siguientes valores cuando se realiza el diseño:

- ◆ Considerar el esfuerzo cortante como el 90% del valor de resistencia a la cedencia de la geomembrana expresada en unidad de fuerza por unidad de área.
- ◆ Establecer el esfuerzo cortante del material a un 50% del valor de la tensión aparente.
- ◆ El valor de falla del esfuerzo cortante se obtiene del resultado de la prueba de resistencia del enlace (desprendimiento del enlace).
- ◆ La resistencia al desprendimiento será del 60% de la resistencia a la cedencia de la geomembrana expresada en unidad de fuerza por unidad de área.
- ◆ La relación por desprendimiento debe ser menor al 10%, considerando la falla por desprendimiento de la lámina (dependiendo del tipo de enlace).

En general, las fallas que se presentan en laboratorio y existe la posibilidad que se presenten en campo se muestran en las tablas 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, y 4.13.

Tabla 4.9 Falla en uniones realizadas con sustancias químicas

Tipo de Rotura	Código del Lugar de Rotura	Descripción de la Ruptura	Clasificación
	BRK	Ruptura en el laminado	Rompimiento de la película del laminado
	BRK		
	BRK		
	SE		


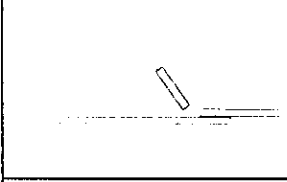
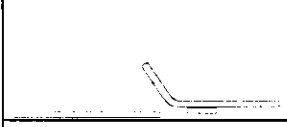
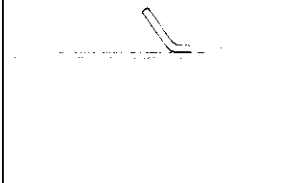
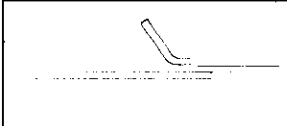
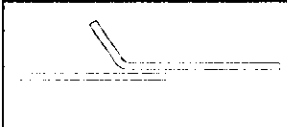
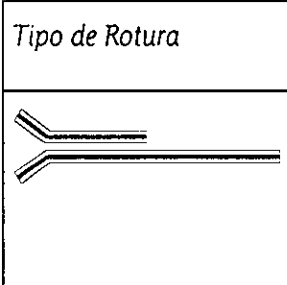
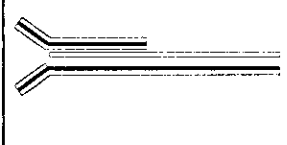
	SE	Ruptura en el borde de la unión	Rompimiento de la película del laminado
	SE		
	AD-BRK	Ruptura en el laminado después de alguna falla de adhesión entre las hojas	Rompimiento de la película del laminado
	AD-BRK		
	AD-BRK		
	AD	Falla en la adhesión entre las hojas	No se presenta rasgadura de la película del laminado

Tabla 4.10 Falla en uniones realizadas con sustancias químicas en geomembranas reforzadas

Tipo de Rotura	Código del Lugar de Rotura	Descripción de la Ruptura	Clasificación
	AD	Falla por adhesión resultando en la separación de las láminas en el plano de unión	Rompimiento de la película del laminado
	DEL	Deslaminación en el plano del tejido (se despega una de las películas de refuerzo)	Rompimiento de la película del laminado

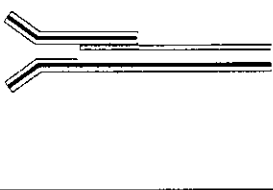
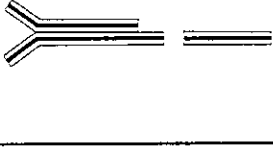
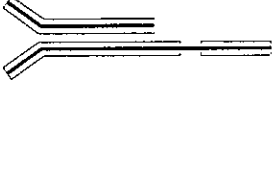
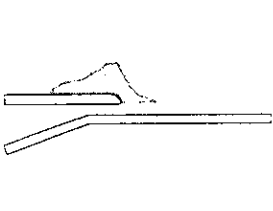
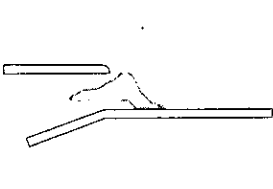
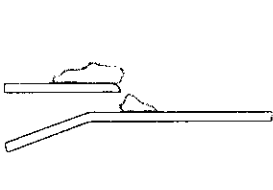
	AD-DEL	Deslaminación en el plano del tejido después de un desplazamiento en el plano de enlace	Rompimiento de la película del laminado
	BRK	Rompimiento continuo de la hoja por alguna falla en la estructura del polímero	Rompimiento de la película del laminado
	FP	Estructura que es arrancada por la tensión que se aplica en dirección paralela a las láminas que forman la hoja	-

Tabla 4.11 Falla en uniones realizadas con extrusión

Tipo de Rotura	Código del Lugar de Rotura	Descripción de la Ruptura	Clasificación
	AD1	Falla por adhesión. Las muestras pueden deslaminarse bajo la zona donde se coloca una capa delgada de sustancia extrusiva	No se presenta rasgadura de la película del laminado
	AD2	Falla en la adhesión	No se presenta rasgadura de la película del laminado
	AD-WLD	Rompimiento en la tira de sustancia extrusiva, las fallas se originan en el borde de la hoja superior y se debe a la falta de adhesión en la zona de unión de las capas	Rompimiento de la película del laminado



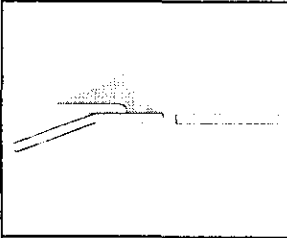
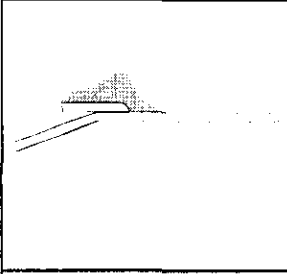
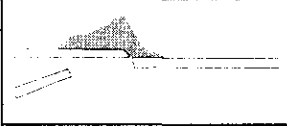
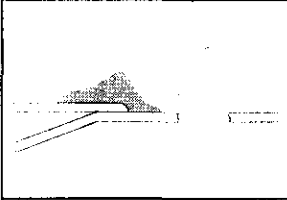
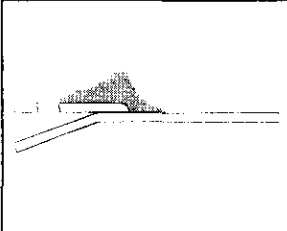
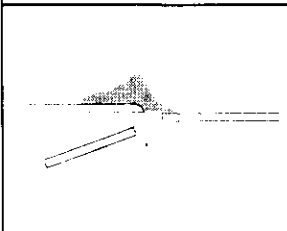

	SE1	Rompimiento en el borde donde termina la unión de la capa inferior o en la zona pulida que no fue cubierta.	Rompimiento de la película del laminado
	SE2	Rompimiento en el borde donde termina la unión de la capa superior o en la zona pulida que no fue cubierta al aplicarse un esfuerzo a tensión	Rompimiento de la película del laminado
	SE3	Rompimiento en la unión por problemas en la capa inferior	Rompimiento de la película del laminado
	BRK1	Rompimiento en el laminado de la hoja inferior donde termina el enlace al someterlo a una fuerza de tensión	Rompimiento de la película del laminado
	BRK2	Rompimiento en el laminado de la hoja superior al aplicar fuerza de tensión, la falla ocurre donde fue pulida la zona	Rompimiento de la película del laminado
	AD-BRK	Rompimiento en la capa inferior después de alguna falla en la adhesión entre la tira de extrusión y la hoja inferior	Rompimiento de la película del laminado
	HT	Rompimiento en el límite de la zona de alta temperatura	-

Tabla 4.12 Falla en uniones realizadas con cuña simple

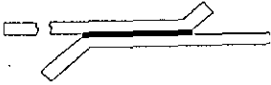
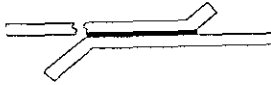
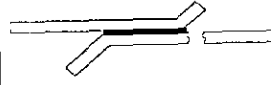
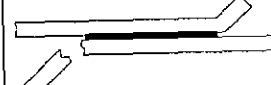
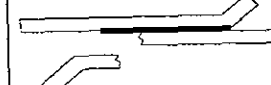
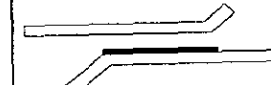

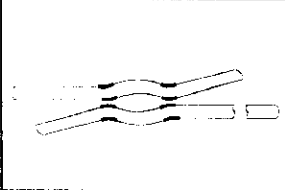
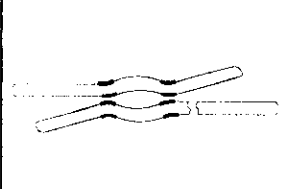
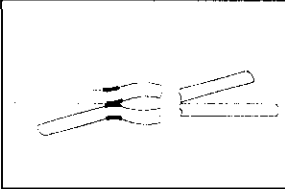
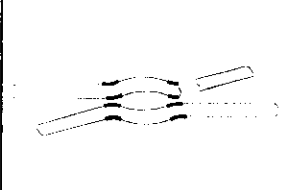
Tipo de Rotura	Código del Lugar de Rotura	Descripción de la Ruptura	Clasificación
	BRK	Ruptura en el área exterior del laminado (daño en cualquier capa)	Rompimiento de la película del laminado
	SE1	Ruptura en la capa superior en el límite de la unión	Rompimiento de la película del laminado
	SE2	Ruptura en la capa inferior en el límite de la unión	Rompimiento de la película del laminado
	SE3	Ruptura del laminado de la hoja inferior	Rompimiento de la película del laminado
	AD-BRK	Ruptura en el laminado después de alguna falla por adhesión entre la sustancia que se forma por el contacto de la cuña y la superficie	Rompimiento de la película del laminado
	AD	Falla por falta de adhesión entre la sustancia formada y la superficie de la capa	No se presenta la ruptura de la película del laminado

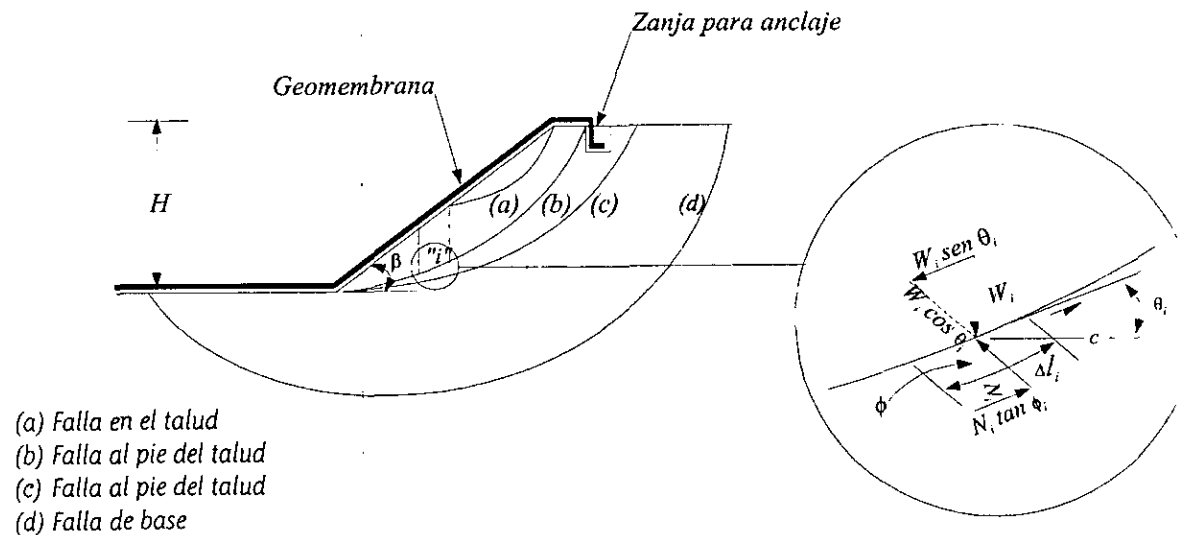
Tabla 4.13. Falla en uniones realizadas con cuña dual

Tipo de Rotura	Código del Lugar de Rotura	Descripción de la Ruptura	Clasificación
	AD	Falla por falta de adhesión	No se presenta la ruptura de la película del laminado
	BRK	Rompimiento en el laminado de cualquiera de las dos capas	Rompimiento de la película del laminado
	SE1	Ruptura en parte exterior del enlace que puede suceder en cualquiera de las dos capas	Rompimiento de la película del laminado
	SE2	Ruptura en el interior del enlace, se presenta en las dos capas	Rompimiento de la película del laminado
	AD-BRK	Ruptura en el primer enlace después de alguna falla por adhesión, que puede ocurrir en una o en las dos capas	Rompimiento de la película del laminado

#### 4.4.2. Estabilidad de Taludes en los Rellenos Sanitarios

El tipo de análisis de la estabilidad de taludes en los rellenos sanitarios depende principalmente del tipo de suelo que se tenga en el lugar, las características que afectan la construcción del talud son: el tipo de suelo y su resistencia, tensiones existentes y humedad, estratos que contienen arenas, limos y arcillas, profundidad del estrato firme, altura del talud, talud de corte, sistema de excavación y duración de esta.

La falla de talud generalmente se considera de tipo circular y se clasifican en falla de talud, de base y de pie (véase la figura 4.14).



- (a) Falla en el talud  
 (b) Falla al pie del talud  
 (c) Falla al pie del talud  
 (d) Falla de base

Figura 4.14 Tipos de posibles fallas en el talud.

El método de solución para este tipo de problemas ha sido mostrado por Koerner (1986) y se fundamenta en la revisión del siguiente Factor de Seguridad en Talud (FST), indistintamente de encontrarse cubierto o no por algún tipo de geosintético.

$$FST = \sum_{i=1}^n \frac{((W_i \cos \theta_i) \tan \theta + \Delta l_i c) R}{(W_i \sin \theta_i) R}$$

donde,

- $W_i$  = peso del corte  $i$ -ésimo,  
 $\theta_i$  = ángulo del  $i$ -ésimo corte con respecto a la horizontal,  
 $\Delta l_i$  = longitud del arco del  $i$ -ésimo corte,  
 $\phi$  = ángulo de resistencia del suelo,  
 $c$  = cohesión del suelo  
 $R$  = radio de falla del círculo, y  
 $n$  = número de cortes utilizados

Cuando el Factor de Seguridad en el Talud (FST) es mayor que uno el talud es estable (aunque no muy seguro), aunque se recomienda emplear un  $FST \geq 1.5$ . Las gráficas que se presentan en el Apéndice I, proporcionan valores directos para suelos cohesivos sin drenar (figura A.1.1) y suelos que basan la resistencia en la cohesiva y friccionante (A.1.2), se representa mediante:

$$FST = \frac{c}{N_s} \gamma H$$

donde,

- $FST$  = Factor de Seguridad en el Talud,  
 $c$  = resistencia del suelo sin drenar,  
 $N_s$  = valor dado por la gráfica,

$\gamma$  = peso unitario total,  
 $H$  = altura vertical del talud

Los círculos de falla al pie del talud (a y b) pueden tener una pequeña variación debida al suelo que cubre la geomembrana el cual se encuentra a tensión, por lo que es necesario sumar un término ( $Ta$ ); en caso de colocar algún geosintético se incluirá el correspondiente ( $Tb$ )

$$FST = \sum_{i=1}^n \frac{[(W_i \cos \theta_i) \tan \phi + \Delta l_i c] R + Ta + Tb}{(W_i \sin \theta_i) R}$$

donde,

$Ta$  =  $\sigma$  permisible t.  
 $a$  = brazo de la palanca con valor máximo igual a  $R$   
 $Tb$  =  $\sigma$  permisible del geotextil t.  
 $b$  = brazo de la palanca con valor máximo igual a  $R$

#### 4.4.3. Estabilidad del Suelo de Cubierta que Protege a la Geomembrana

##### Espesor Uniforme

El suelo de cubierta se emplea para proteger la capa contra la oxidación, fotodegradación, rompimiento por hielo, objetos punzantes, accidentes y daños intencionales, además de conseguir minimizar las temperaturas extremas y eliminar la entrada de aire bajo el lienzo.

Los problemas se presentan en los taludes ya que el suelo colocado sobre las capas impermeables generalmente se desploma debido a la escasa fricción en la zona.

La figura 4.15, ilustra el problema y el sistema de fuerzas establece el ángulo deseado para evitar el deslizamiento, a través de un Factor de Seguridad para Suelo de Cubierta ( $FSC$ ).

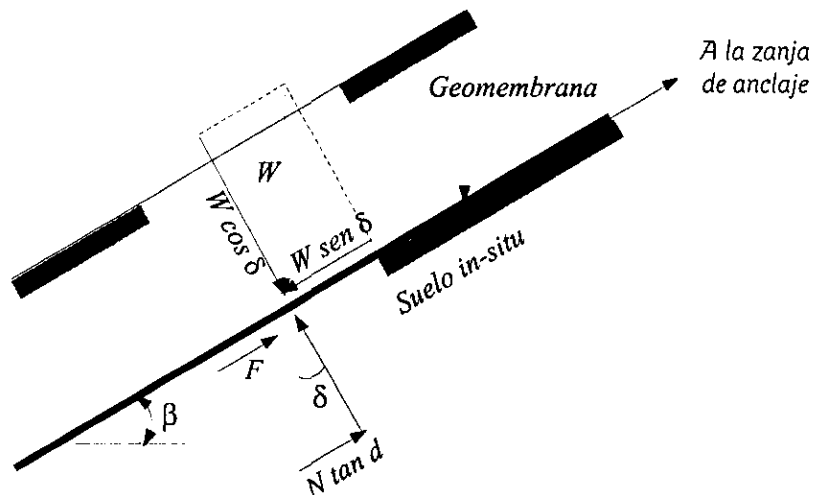


Figura 4.15 Fuerzas que actúan en los taludes con barreras de espesor constante

$$FSC = \frac{\text{Fuerzas Resistentes}}{\text{Fuerzas Transmitidas}}$$

$$FSC = \frac{F}{W \text{ sen } \beta} = \frac{\tan \delta}{W \text{ sen } \beta} = \frac{W \cos \beta \tan \delta}{W \text{ sen } \beta}$$

$$FS = \frac{\tan \delta}{\tan \beta}$$

donde,

$\beta$  = ángulo del talud,  
 $\delta$  = ángulo de fricción entre la geomembrana y el suelo de cubierta

Espesor Menor Conforme Aumenta la Pendiente

Se basa en el hecho de aliviar un poco el peso del suelo para lograr un sistema en equilibrio, en el que actúan una serie de fuerzas activas y un bloque neutral, como se muestra en la figura 4.16.

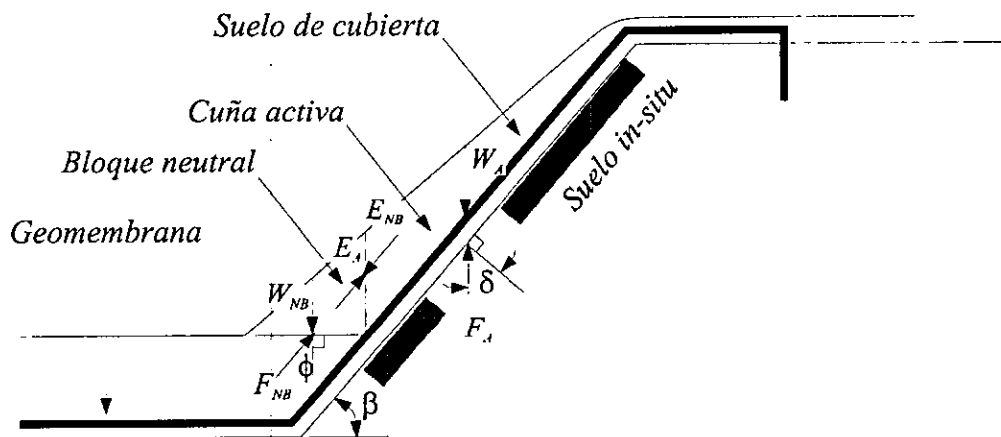


Figura 4.16 Fuerzas que actúan en los taludes con barreras de espesor variable

Para la solución de este problema se utiliza la misma ecuación general del caso anterior ( $FSC = \text{Fuerzas Resistentes} / \text{Fuerzas Transmitidas}$ ), solo que hay que considerar las siguientes variables.

$W_A$  = peso de la cuña activa,  
 $F_A$  = fuerza de fricción de la cubierta del suelo actuando sobre la capa,  
 $\delta$  = ángulo de las fuerzas de fricción en la cubierta del suelo actuando sobre la geomembrana,  
 $E_A$  = fuerza del bloque neutral actuando sobre la cuña activa,  
 $E_{NB}$  = fuerza de la cuña activa actuando sobre el bloque neutral  
 $W_{NB}$  = el peso del bloque neutral,  
 $F_{NB}$  = fuerza de fricción del suelo bajo el bloque neutral,  
 $\phi$  = ángulo de resistencia cortante del suelo.

**CAPÍTULO 5**

**SISTEMAS IMPERMEABLES PARA LA CUBIERTA Y LA BASE DEL RELLENO.**

5.1.	Sistema de Cubierta	103
5.2.	Sistemas Impermeables para la Base del Relleno	107
5.2.1.	El Sistema Convencional	107
5.2.2.	El Sistema Doble	108

## Sistemas Impermeables para la Cubierta y la Base del Relleno

Los sistemas de cubierta y de la base deben trabajar en conjunto para garantizar la disminución de entrada de agua al sistema y la generación de lixiviados. Si las precipitaciones se presentan antes de la colocación de la cubierta (preclusura), el sistema impermeable de las barreras en la base del relleno detendrá el lixiviado en la zona de filtración. En esta parte, el sistema de bombeo extrae la sustancia que será almacenada y reciclada al relleno sanitario. Si las lluvias llegan después de colocar el sistema de cubierta (posclusura), es seguro que este ya instalado, disminuirá y controlará el agua antes de tener contacto con los residuos sólidos municipales. El uso de celdas profundas con vida útil corta, favorecen la disminución del lixiviados ya que el área de infiltración será menor.

### 5.1. El Sistema de Cubierta

El sistema de cubierta está compuesto por una serie de materiales filtrantes y de baja permeabilidad, los cuales, controlan y disminuyen la posible entrada de agua al relleno sanitario.

La velocidad en la producción de lixiviados es resultado de la precipitación y la salida de líquidos de los residuos dispuestos, la putrefacción y descomposición de la materia orgánica.

Cuando aún no se ha construido el sistema de cubierta, la generación de lixiviados puede calcularse de la siguiente manera:

$$L_v = P + S - E - F_c$$

donde,

$L_v$  = volumen del lixiviado en la preclusura,

$P$  = volumen por precipitación,

$S$  = volumen del líquido obtenido por la presión de poro,

$E$  = volumen perdido a través de la evapotranspiración,

$F_c$  = capacidad de campo de la basura.

Para establecer la cantidad de lixiviado producida a largo plazo (producción en la posclusura), se requiere evaluar el funcionamiento del sistema de cubierta. Existen diferentes métodos para obtener la cantidad final de lixiviados, aunque se ha utilizado tradicionalmente el de balance de agua, éste solo debe emplearse para sistemas de cubierta con alta permeabilidad o en la preclusura. El uso de fórmulas empíricas que proporcionan valores más aproximados a la realidad. Bagchi (1990), recomienda el uso de la siguiente ecuación empírica:

$$\text{Infiltración} = e^{\left( K + \beta_1 \ln W_p + \beta_2 \ln \left( \frac{W_i}{W_r} \right) + \beta_3 \ln \gamma_D + \beta_4 \ln \alpha + \beta_5 C_c \right)}$$



donde,

$W_p$  = precipitación en milímetros,

$\alpha$  = pendiente de la superficie del relleno,

$W_i$  = contenido de humedad inicial en el suelo de la cubierta (%),

$W_f$  = capacidad de campo del suelo (%),

$\gamma_b$  = densidad del suelo en  $\text{kg/m}^3$ ,

$C_c$  = coeficiente de curvatura del suelo,

$\beta_1$  a  $\beta_5$  = constantes.

Hay que considerar que la mejor alternativa es el analizar los valores de infiltración en la zona seleccionada o en los alrededores.

El diseño y construcción del sistema de cubierta depende de las condiciones climáticas que se presentan en el lugar donde se ubica el sitio de disposición. Es obvio que los sistemas de cubierta de alta permeabilidad pueden ser usados en sitios de baja precipitación (previo estudios de infiltración y precipitación). En las zonas de alta precipitación lo recomendable es el uso de barreras que detengan por lo menos el 80% del agua de lluvia que supera la cubierta vegetal. Una pendiente adecuada para el filtro (se recomienda del 2 al 5%), facilita la salida del agua del sistema de cubierta.

Antes de seleccionar un sistema de cubierta es importante evaluar:

- ◆ La precipitación que se presenta en las zonas que rodean al sitio de disposición.
- ◆ Los lugares de donde provengan escurrimientos y la cantidad que posiblemente se infiltre (establecer mediciones en campo).
- ◆ Los materiales de cubierta a utilizar evaluando disponibilidad, durabilidad, costo, espesor y cantidades requeridas.
- ◆ La pendiente óptima (del 2 al 5%) considerando la precipitación para evitar la posible erosión.
- ◆ La posible cantidad de gas que se generará en el relleno.

Bagchi (1990), Daniel et al (1990), Tchobanoglus et al (1994) y McBean et al (1995) mencionan los componentes que se utilizan frecuentemente en este sistema:

- ◆ *Capa para nivelación.* Para su construcción se utiliza grava fina, el espesor puede alcanzar de 15 a 60cm. Se coloca encima de los residuos sólidos municipales y sus principales funciones son emparejar o nivelar el terreno, servir de filtro para la extracción del biogás y funcionar de soporte para la colocación de las capas subsecuentes.
- ◆ *Barrera impermeable* (en este caso se puede utilizar algún tipo de arcilla o geomembrana). Su función es disminuir la entrada de agua para evitar la generación excesiva de lixiviados, el espesor que se recomienda varía de 30 a 60cm en el caso de las arcillas y para las geomembranas es posible seleccionar entre una amplia gama de materiales.

que se recomienda varía de 30 a 60cm en el caso de las arcillas y para las geomembranas es posible seleccionar entre una amplia gama de materiales.

- ◆ *Capa de filtración y protección.* Alcanza de 30 a 105 cm de espesor; los materiales que la componen son la arena y grava. En caso de colocarse en la barrera impermeable arcilla, es necesario protegerla con arena húmeda que alcanzará 1/3 de la altura del espesor de diseño; la grava ocupará el resto del espesor.
- ◆ *Cubierta vegetal.* Varía de 15 a 50cm y se compone de un suelo orgánico en el cual se siembra algún tipo de pasto adecuado a las condiciones del lugar. También puede utilizarse un geotextil para separar esta capa de la anterior; la utilidad de esta es facilitar la evapotranspiración, evitar la erosión y proteger a los otros elementos del sistema.

La figura 5.1, muestra el perfil de un sistema de cubierta tradicional.

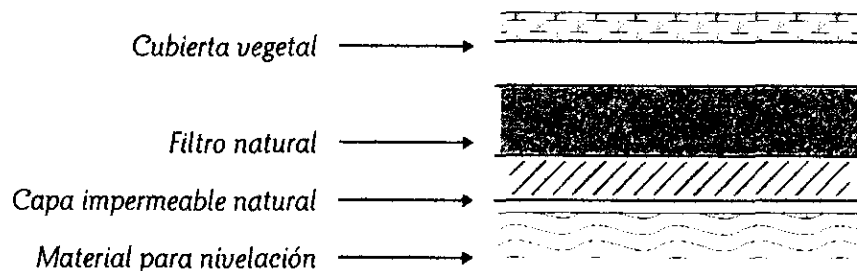


Figura 5.1. Sistema de cubierta convencional.

Si los puntos anteriores se analizan y aplican adecuadamente, se conseguirán los beneficios siguientes:

- ◆ Operar con un mínimo mantenimiento en la posclausura.
- ◆ Influir en la rápida estabilización de los residuos para que el sitio se pueda reutilizar lo antes posible.
- ◆ Generar la aceptación de los vecinos del lugar al no dañar el paisaje de la zona.
- ◆ Prevenir el movimiento de polvo, humo y cenizas.
- ◆ Suprimir posibles incendios.
- ◆ Contener los gases y vapores.

Sistemas similares al anteriormente descrito, con los espesores máximos de las barreras impermeables naturales, uso de geomembrana y un sistema de bombeo, ha sido mencionado por Fenney y Maxson (1993) para encapsular rellenos sanitarios que tenían sistemas de cubierta deficientes. El documento indicaba que antes de la construcción de este tipo de sistema se medían (en el filtro superior de una sistema de doble barrera impermeable) flujos que variaban de 1.87 a 14.96 m<sup>3</sup>/ha/día después de colocar la cubierta los gastos disminuyeron paulatinamente hasta

Sin embargo, el problema más difícil que enfrenta el sistemas de cubierta, es el de los asentamientos diferenciales, provocados por la estabilización de los residuos y la consolidación de las barreras naturales. Para solucionarlo, se ha propuesto el uso de diferentes geosintéticos. En este aspecto, los materiales que han mostrado avances son en los que se utilizan georedes o geomallas biaxiales colocadas bajo las geomembranas.

Weiss et al (1995) informa de un sistema diseñado y probado en campo que funcionó eficientemente ya que solo permitió la infiltración del 10% del volumen de precipitación. Este sistema se probó para taludes 3:1 con un factor de seguridad de 1.4.

Las especificaciones para el perfil del sistema son las siguientes:

- ◆ Capa para nivelación de 30cm de espesor. Elaborada con agregados con diámetro que varía de 2 a 16 mm.
- ◆ Barrera impermeable. Compuesta por una geomembrana de bentonita ( $3.5\text{kg/m}^2$ ) con  $k \leq 5 \times 10^{-7}$  cm/seg ( es posible utilizar otro tipo de geomembrana ).
- ◆ Cubierta de drenaje. Requiere de grava controlada con las especificaciones de la capa de nivelación o uso de geored y geomalla que proporcionen las características deseadas.
- ◆ Cubierta vegetal. Formada por un espesor de 50cm.

El análisis en campo del sistema se realizó vertiendo en aproximadamente  $19\text{ l/m}^2$  en 3.5 horas; esto aceleró los asentamientos diferenciales en el sistema. En los 5 días de experimentación, se vertieron en promedio  $60\text{ l/m}^2$ , los valores de precipitación superaron los  $14\text{ l/m}^2$  (en este valor se clasifica a la lluvia como persistente). Se estimó que solo el 10% del agua que se derramó penetró las barreras de cubierta.

En condiciones húmedas los valores para deslizamiento entre las capas por los esfuerzos a los que se sometió el sistema, se presentaron a los  $26.6^\circ$  y la falla a los  $29.5^\circ$ . Cuando el experimento se efectuó sin lluvia, el colapso se presentó a los  $31^\circ$ . Las deformaciones alcanzadas para geotextiles y geomembranas de bentonita fueron del 5% y en las zonas de traslape hasta el 20%. Sin embargo, no se presentaron incrementos en los valores de la conductividad hidráulica debido a las características elásticas y de impermeabilidad de las sustancias bituminosas que sirven de enlace entre los lienzos de bentonita.

La figura 5.2, presenta el perfil de este sistema:

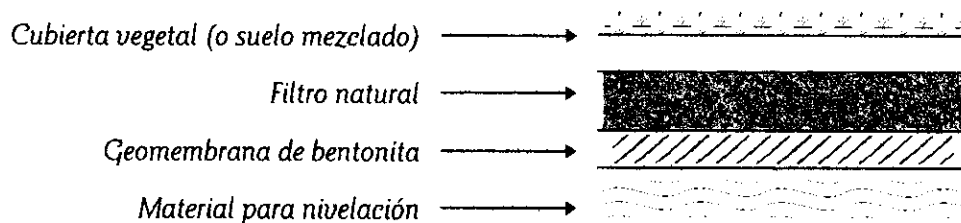


Figura 5.2 Sistema de cubierta a base de geomembrana de bentonita.

## 5.2. Sistemas Impermeables para la Base del Relleno Sanitario

Los sistemas impermeables para la base del relleno, están compuestos por un conjunto de materiales impermeables (naturales o artificiales) y filtrantes que tienen como función evitar el paso de lixiviados y permitir su extracción.

Actualmente, se utilizan dos tipos de sistemas:

- ◆ El convencional. Formado por una barrera impermeable (naturales, artificiales o ambas) de al menos 1.00m de espesor y una capa de material filtrante en su superficie para extraer los lixiviados.
- ◆ El sistema doble. Formado por dos sistemas de barreras impermeables (naturales, artificiales o ambas) de espesor variable, divididas por una capa de material filtrante que se utiliza para la extracción de lixiviados

El sistema doble se diseñó principalmente para regiones que tienen precipitaciones altas y medias. Actualmente, se utiliza también en centros de confinamiento.

### 5.2.1. El Sistema Convencional

Ha sido el más utilizado durante tres décadas, ha sido mejorado por mandato de la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos en 1982, se exigió el uso de geomembranas como complemento para la barrera natural, el perfil del sistema es el siguiente:

- ◆ Una barrera impermeable natural de 0.50 a 1.50m de espesor.
- ◆ Una geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) de 1.50 a 2.5mm.
- ◆ Una barrera de material de protección para la geomembrana de 10 a 20cm de espesor,
- ◆ Un filtro natural de grava de 30cm de espesor (o material equivalente para la extracción de lixiviados).
- ◆ Sistema de bombeo para extracción de lixiviados.

La figura 5.3, presenta el perfil del sistema convencional:

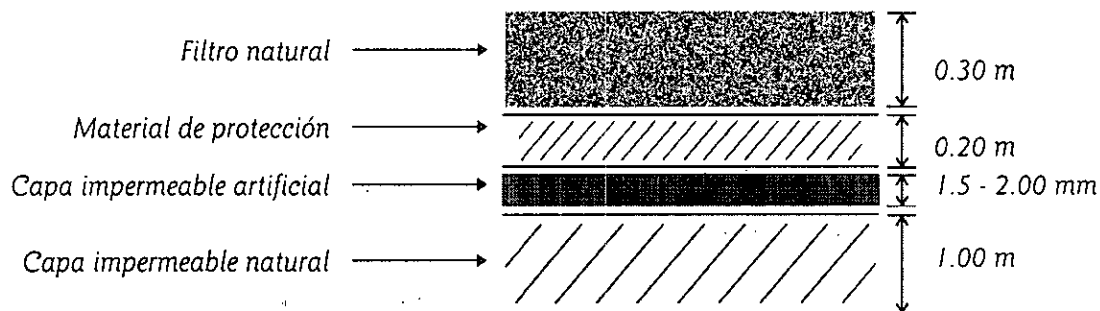


Figura 5.3 Perfil del sistema convencional.

Este sistema basa su eficiencia en los siguientes puntos:

- ◆ Baja permeabilidad por el trabajo en conjunto de las dos barreras.
- ◆ Operación eficiente del sistema para la extracción de lixiviado, permitiendo una altura máxima de 30cm en el filtro.
- ◆ Eficiencia del sistema de cubierta para disminuir considerablemente el paso del agua de lluvia.

Por lo anterior, es recomendable que este sistema se establezca en lugares donde la precipitaciones son bajas.

Las principales desventajas que se tienen en este sistema son:

- ◆ El difícil control de lixiviados.
- ◆ No hay forma de saber como está funcionando la barrera ya que no se cuantifica cuanto lixiviado ha atravesado las capas.
- ◆ Una vez que el lixiviado ha superado las barreras difícilmente se evitará que sean contaminados el suelo y los acuíferos.

### 5.2.2. El Sistema Doble

El sistema doble, empezó a ser utilizado en los ochentas en zonas donde hay altas precipitaciones. El perfil se presenta en la figura 5.4.

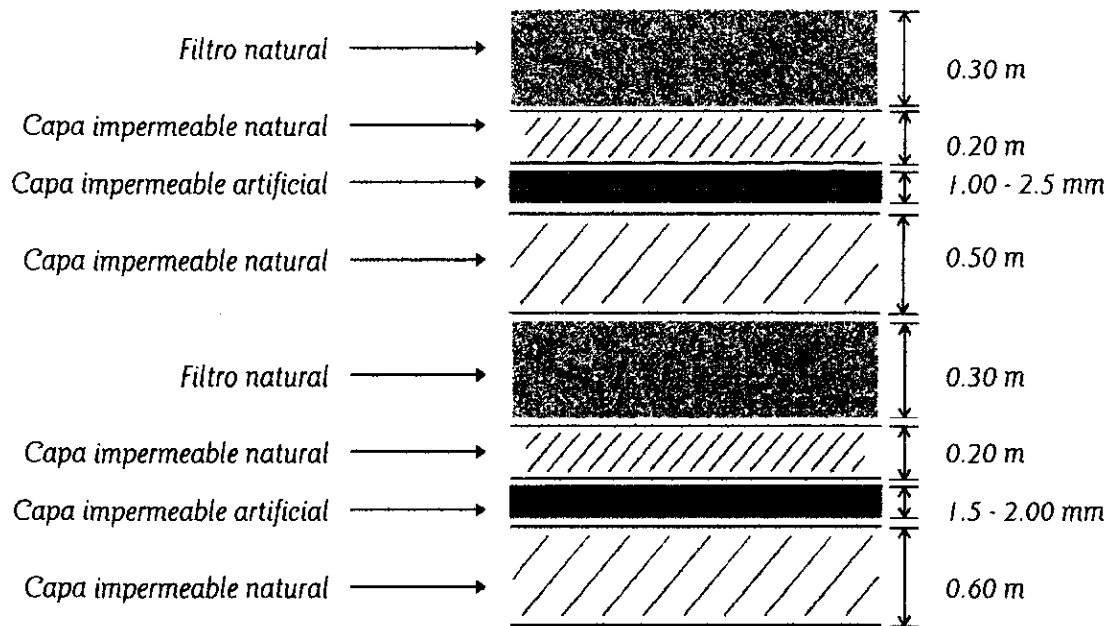


Figura 5.4 Perfil del sistema doble

El contorno muestra una base inferior que se compone del sistema tradicional. La parte superior (exterior), se compone de materiales de menor espesor. Las especificaciones para la parte exterior son las siguientes:

- ◆ Una barrera impermeable natural de 0.50m.
- ◆ Una geomembrana de polietileno de alta densidad (HDPE) de 1.50mm.
- ◆ Una barrera de protección para la geomembrana (suelo de 10 a 20cm de espesor o un geotextil de 1.50 a 2.00mm).
- ◆ Un filtro natural de grava de 30cm de espesor o una geomalla para la extracción de lixiviado.

El uso del sistema doble permite controlar con relativa facilidad la generación de lixiviados en la preclusura y posclusura. Las sustancias que superan la primera barrera se extraen del segundo filtro que se encuentra en la base del relleno. Bonaparte et al 1990, Daniel et al 1993, Broderick et al 1990, indican el uso de diferentes suelos y materiales para la construcción de la parte superior del sistema. Así, se ha analizado el funcionamiento de las geomembranas de bentonita saturada y barreras de arcilla con filtros de arena o geomallas, además de geomembranas de polietileno de alta densidad (HDPE) y barreras naturales. Los estudios realizados han proporcionado la siguiente información:

- ◆ La velocidad de infiltración en el sistema de geomembrana - barrera natural, está en función de: el tipo y espesor de la geomembrana, los minerales de arcilla, las características químicas del lixiviado y la carga hidráulica de éste, actuando a través de las capas.

- ◆ Las barreras construidas con algunos minerales de arcilla son afectadas directamente en la permeabilidad debido a la sensibilidad que tienen ante los lixiviados.
- ◆ El uso de dos tipos barreras impermeables disminuye el riesgo de flujo en caso de rotura o falla de alguna; esto no sucede cuando se utilizan materiales que tienen alta permeabilidad.
- ◆ Los daños o rasgaduras en la geomembrana incrementan el flujo de lixiviado en el sistema, indistintamente del otro tipo de barrera con el que se encuentre funcionando.

Con los sistemas dobles es posible obtener con facilidad la siguiente información:

- ◆ Frecuencia de ocurrencia en la cantidad de lixiviado generado.
- ◆ Fuentes posibles de generación y la velocidad de flujo.
- ◆ Rangos de valores razonables del lixiviado que se genera en la primera capa y la velocidad a que pasa a través de los diferentes sistemas construidos.

La Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos de América menciona que el principal indicador del buen funcionamiento del sistema es que el flujo no exceda los 200 l/ha/d. En caso de que los valores sean superiores es necesario establecer planes de contingencia que disminuyan la cantidad de lixiviado; estos planes no se aplican si se presentan valores debido a tormentas extraordinarias.

Bonaparte et al 1990, informó que después de analizar 30 celdas de sistemas dobles utilizando como materiales impermeables geomembranas de HDPE, bentonita y barreras naturales (0.50 m de espesor), drenes de arena (0.30 m) y geomallas, considerando condiciones climáticas donde la precipitación anual oscilaba de 910 a 1520 mm, obtuvo los valores que se observan en la tabla 5.1.

<i>Materiales Combinados para la Barrera Superior</i>	<i>Lixiviado Durante la Preclausura (l/ha/d)</i>	<i>Lixiviado Durante la Posclausura (l/ha/d)</i>
<i>Geomembrana (HDPE) Geomalla</i>	<i>5-270</i>	<i>15-810</i>
<i>Geomembrana Arena</i>	<i>20-350</i>	<i>30-310</i>
<i>Barrera Natural Geomalla</i>	<i>20-200</i>	<i>14-230</i>
<i>Barrera Natural Arena</i>	<i>100-200</i>	<i>20-189</i>
<i>Geomembrana de Bentonita Arena</i>	<i>0-90</i>	

*Tabla 5.1 - Permeabilidad en diferentes sistemas impermeables.*

El estudio indicó que cuando se utilizan geomembranas de bentonita saturadas con agua, éstas fueron prácticamente impermeables. Investigaciones efectuadas recientemente por Ruhl et al 1997, apoyan parcialmente los resultados de la tabla. Aún cuando el informe de Bonaparte no proporciona detalles sobre las características del lixiviado ni los amortiguadores que contenían las geomembranas de bentonita.

Daniel et al 1997, menciona que las barreras elaboradas a base de bentonita sódica o cálcica presentan altos incrementos en la conductividad hidráulica, cuando no han sido hidratadas con agua antes de entrar en contacto con lixiviados.

Los lixiviados y sustancias que dañan a la bentonita presentan las siguientes características:

- ♦  $\text{pH} < 5$  o  $\text{pH} > 12$ .
- ♦ Altas cantidades de calcio.

Existe incertidumbre en relación a los períodos de tiempo en que las geomembranas de bentonita saturadas mantienen bajos valores de permeabilidad. El uso de amortiguadores para disminuir la agresividad de los lixiviados y mantener sus propiedades ha dado buenos resultados en pocas ocasiones.

Por otra parte, el informe de Bonaparte et al 1990, señala que la principal desventaja en los sistemas donde se utilizan geomembranas de HDPE con arena o geomallas, es que al presentarse fallas en los enlaces, rasgadura o roturas; la permeabilidad promedio se incrementa fuertemente (de 17 000 a 30 000 l/ha/d). Esto se debe, a que no existe otro componente de baja permeabilidad que trabaje conjuntamente y disminuya el flujo de los lixiviados.

Los valores más favorables de baja permeabilidad, se obtienen para los sistemas conjuntos de geomembrana de HDPE y barreras naturales ya que los valores que reportan (0.50 a 150 l/ha/d) del lixiviado se presentan después de varios meses o años. Es decir, este tipo de sistema es menos riesgoso que los anteriores



## **CAPÍTULO 6**

### **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y COSTOS POR DISPOSICIÓN**

6.1.	Diseño de los Sistemas para la Base y la Cubierta	115
6.1.1.	Especificaciones Técnicas para las Barreras Naturales	118
6.1.2.	Especificaciones Técnicas para las Geomembranas	118
6.1.3.	Especificaciones Técnicas para Georedes, Geomallas y Filtros Naturales	119
6.2.	Construcción	120
6.2.1.	Actividades y Equipos	120
6.3.	Costos por Disposición	120

### 6.1. Diseño de los Sistemas para la Base y la Cubierta

Los perfiles de los diseños de las *barreras impermeables naturales para la base del relleno* que se muestran en las tablas, han sido presentados y analizados por Landreth (1990), Bonaparte et al 1990, Dennis et al 1990, Daniel et al 1990, Johnson et al 1990, Goldman et al 1990, Daniel (1993).

En México la Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos, A.C., presentó en 1993 y 1994 el documento: "Notas de los Residuos Sólidos y Peligrosos" Tomo I, Volúmenes III y IV y un Suplemento Especial en el Invierno de 1993. De éste, se ha tomado el sistema recomendado por la Organización Panamericana de la Salud (OPS).

Los perfiles que se muestran en las *tablas 6.1 y 6.2* son de *sistemas convencionales*, los restantes pertenecen a *sistemas dobles* (6.3, 6.4 y 6.5).

Convencional (OPS)		Espesor	Unidad
10	Barrera Natural Impermeable	0.60	m
	Arcilla (CL)	0.36	m
	Arena	0.18	m
	Grava	0.06	m
20	Barrera de Protección Compactada	0.20	m
30	Geomembrana (HDPE)	1.50	mm
40	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20	m
50	Capa para Drenaje	0.30	m

Tabla 6.1 Sistema convencional recomendado por la OPS.

Convencional		Espesor	Unidad
10	Barrera Natural Impermeable	1.00	m
	Arcilla (CL)	0.60	m
	Arena	0.30	m
	Grava	0.10	m
20	Barrera de Protección Compactada	0.20	m
30	Geomembrana (HDPE)	1.50	mm
40	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20	m
50	Capa para Drenaje	0.30	m

Tabla 6.2 Sistema convencional tradicional.

Barrera Natural -HDPE		Espesor	Unidad
60	Barrera Natural Impermeable	0.60	m
	Arcilla (CL)	0.36	m
	Arena	0.18	m
	Grava	0.06	m
70	Barrera de Protección Compactada	0.20	m
80	Geomembrana (HDPE)	1.50	mm
90	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20	m
100	Capa para Drenaje	0.30	m
110	Barrera Natural Impermeable	0.50	m
	Arcilla (CL)	0.30	m
	Arena	0.50	m
	Grava	0.05	m
120	Barrera de Protección Compactada	0.20	m
130	Geomembrana (HDPE)	1.50	mm
140	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20	m
150	Capa para Drenaje	0.30	m

Tabla 6.3 Sistema doble construido a base de barreras naturales y HDPE

Arena-HDPE		Espesor	Unidad
160	Barrera Natural Impermeable	0.60	m
	Arcilla (CL)	0.36	m
	Arena	0.18	m
	Grava	0.06	m
170	Barrera de Protección Compactada	0.20	m
180	Geomembrana (HDPE)	1.50	mm
190	Material de Protección (Arcilla CL)	0.20	m
200	Capa para Drenaje	0.30	m
220	Arena	0.30	m
230	Geomembrana de HDPE	1.50	mm
240	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20	m
250	Capa para Drenaje	0.30	m

Tabla 6.4 Sistema doble construido en la parte exterior a base de arena y HDPE

<i>Geomembranas de Bentonita-HDPE</i>		Espesor	Unidad
260	Barrera Natural Impermeable	0.60	m
	Arcilla (CL)	0.36	m
	Arena	0.18	m
	Grava	0.06	m
270	Barrera de Protección Compactada	0.20	m
280	Geomembrana (HDPE)	1.50	mm
290	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20	m
300	Capa para Drenaje	0.30	m
310	Geored	3.00	mm
320	Geomembrana de Bentonita (Superior)	2.00	mm
330	Geomembrana de HDPE (Superior)	1.50	mm
340	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20	m
350	Geomalla	5.00	mm
360	Capa para Drenaje	0.10	m

*Tabla 6.5 Sistema doble construido en la parte superior a base de geomembranas de bentonita y HDPE*

Los sistemas de cubierta que se muestran en las tablas 6.6, 6.7 y 6.8, han sido mencionados por Bagchi (1990), Daniel (1990), Sharma et al 1993, Weiss et al 1995. El perfil de estos se presenta a continuación:

<i>Tradicional</i>		Espesor	Unidad
500	Cubierta de Suelo Mezclado	0.30	m
510	Capa de Drenaje y Protección	0.30	m
520	Barrera Natural Impermeable	0.30	m
522	Arcilla (CL)	0.18	m
525	Arena	0.09	m
527	Grava	0.03	m
530	Material para Nivelación	0.30	m

*Tablas 6.6 Sistema tradicional de cubierta*

<i>Alternativo</i>		Espesor	Unidad
500	Cubierta de Suelo Mezclado	0.50	m
510	Capa de Drenaje y Protección	0.30	m
520	Geomembrana de Bentonita	2.00	mm
530	Material para Nivelación	0.30	m

*Tablas 6.7 Sistema de cubierta alternativa*

	Compuesto	Espesor	Unidad
580	Cubierta de Suelo Mezclado	0.50	m
590	Capa de Drenaje y Protección	0.05	m
595	Geomalla	10.00	mm
600	Geomembrana de HDPE	1.00	mm
612	Geored Biaxial	3.00	mm
620	Material para Nivelación	0.30	m

Tabla 6.8 Sistema de cubierta compuesto

### 6.1.1. Especificaciones Técnicas para las Barreras Naturales

Bagchi (1989), Daniel (1990) y Goldman et al 1990, reportan resultados óptimos ( $k \leq 1 \times 10^{-7}$  cm/s) en los valores de las barreras impermeables cuando se construyen respetando las siguientes especificaciones:

- ◆ Índice Plástico (IP)  $\approx$  10 al 15%
- ◆ Límite Líquido (LL)  $\approx$  25 al 30%
- ◆ Contenido de arcilla  $\approx$  18 al 25%
- ◆ 40 ó 50% del tamaño de partícula de la barrera será  $\leq 0.074$  mm
- ◆ Compactación respecto a la Prueba Proctor Estándar  $\approx$  90 al 95%
- ◆ Contenido de humedad óptimo  $\approx$  2 al 8%
- ◆ Conductividad hidráulica máxima  $\leq 1 \times 10^{-7}$  cm/seg

Sharma y Hullins (1993) confirman esta tendencia, aunque mencionan que para contenidos de arcilla de hasta el 40% (generalmente con índices plásticos menores al 50%), alcanzaron valores de hasta  $5 \times 10^{-8}$  cm/seg.

### 6.1.2 Especificaciones Técnicas para las Geomembranas

Michelangeli (1993) señala las siguientes especificaciones que rigen para las geomembranas de polietileno de alta densidad en diversos países de la Comunidad Europea:

- ◆ Espesor de 1.5 a 2 mm  $\pm$  10%.
- ◆ Composición, polímero virgen  $\geq$  97%, carbón negro  $\geq$  2 %.
- ◆ Densidad óptima de 0.940 a 0.965 g/cm<sup>3</sup>.
- ◆ Coeficiente térmico de elongación  $\leq 2.2 \times 10^{-4}$  / °C.
- ◆ Resistencia al impacto. Se debe especificar según el espesor.
- ◆ Resistencia a ceder por tensión  $> 17$  N/mm.
- ◆ Resistencia de falla por tensión  $> 24$  N/mm.
- ◆ Cedencia de elongación  $> 9\%$ .
- ◆ Corte de elongación  $> 600\%$ .
- ◆ Resistencia por desgarre  $> 130$  N/mm.
- ◆ Fragilidad a bajas temperaturas  $> -50^\circ\text{C}$ .

- ◆ Resistencia a la perforación. Se debe revisar con el fabricante.
- ◆ Resistencia al rompimiento por esfuerzo ambiental  $> 1000$  h.

El uso de estos parámetros garantiza alta calidad en la adquisición de la geomembrana independientemente del fabricante que la proporcione.

En el caso de las geomembranas de bentonita, los rangos de valores para los diferentes conceptos de interés se indican a continuación:

- ◆ El ancho de los lienzos varía de 4.21 a 5.30 m.
- ◆ El largo es de 38.10 a 61.00 m.
- ◆ Masa/unidad de área es de 0.046 a 0.048  $\text{kN/m}^2$ .
- ◆ Conductividad hidráulica cuando está saturada es de  $5 \times 10^{-11}$  a  $5 \times 10^{-14}$  cm/s.
- ◆ Componentes en la estructura. Varían según el tipo de geotextil que se emplee como confinante.
- ◆ Propiedades a la tensión. Están en función del geotextil.

### 6.1.3. Especificaciones para las Geomallas, Georedes y Filtros Naturales

Las función de las geomallas es permitir el drenaje en espacios menores. Este tipo de geosintéticos tienen problema al someterse a presiones elevadas ya que se produce la disminución del espesor. Por eso, se recomienda que trabajen conjuntamente con arenas gruesas o gravas. El uso de una pendiente adecuada (2 al 5%) hace más eficiente su funcionamiento, los valores extremos de diferentes tipos de geomallas se muestran a continuación:

- ◆ Ancho del lienzo de 2.00 a 5.00 m.
- ◆ Longitud de 35 a 50 m.
- ◆ Espesor, varía de 5 a 10 mm.
- ◆ Tamaño de las ranuras de la malla de 0.15 a 2.00 mm.
- ◆ Filtración variable. Depende de los valores de presión y del gradiente; algunos rangos de valores son  $1 \times 10^{-3}$   $\text{m}^2/\text{s}$  hasta  $4 \times 10^{-5}$   $\text{m}^2/\text{s}$ .
- ◆ Resistencia a la compresión. Depende del tipo de material y del espesor.

Las georedes proporcionan estabilidad estructural al suelo o material con el que interactúan ya que tienen alta resistencia a la tensión. Los materiales que se utilizan para la fabricación son el poliéster, policloruro de vinilo, fibra de vidrio y polímeros elastómeros. Los parámetros de mayor interés son:

- ◆ Tipo de tejido. Se divide en normal o de punto.
- ◆ Espesor de 3 a 10 mm.
- ◆ Masa / unidad de área. Varía de 114 hasta 1288  $\text{g/m}^2$  dependiendo del material de fabricación.
- ◆ Tamaño de abertura de 12.50 a 45.00 mm.
- ◆ Resistencia última. Variable, ya que depende del material que se haya construido.

Los filtros naturales se elaboran a base de grava y arena, el tamaño de partícula más empleado varía de 19 a 25 mm. Es importante recordar que a mayor tamaño de partícula la permeabilidad aumenta, y la velocidad del flujo se incrementa a mayor pendiente.

## 6.2. Construcción

El proceso de construcción del sistema impermeable, se logra a mediante el acondicionamiento del sitio, el movimiento de tierras, la puesta, compactación y escarificación del material, colocación de las barreras protectoras, geomembranas y filtros naturales y artificiales. La realización de las actividades anteriores obliga al uso de diferentes equipos y materiales, los que pueden ser vistos a detalle en el Apéndice 2.

### 6.2.1. Actividades y Equipos

A continuación se indican de manera general las diferentes actividades. El detalle de estas puede consultarse en el Apéndice 2.

- ◆ Extracción, carga y acarreo del material a utilizar para la construcción de los diferentes tipos de barreras.
- ◆ Despalme y limpieza del sitio.
- ◆ Trazo y nivelación.
- ◆ Material tendido en capas de 20 cm.
- ◆ Incorporación del agua.
- ◆ Compactación del material.
- ◆ Escarificación entre capas para garantizar un adecuado enlace.
- ◆ Colocación de la geomembrana (hdpe o de bentonita).
- ◆ Colocación de la geored.
- ◆ Colocación de la geomalla.

Los equipos que se utilizan son: *retroexcavadora CAT 235 de 195HP, camión de volteo FAMSÁ de 7m<sup>3</sup> y 140HP, motoconformadora CAT 140B de 150HP, cargador frontal CAT con escarificador de 1.82m, tractor D7 de 215HP con hoja empujadora de 3.35m, tránsito para medición CH5, nivel de medición KE-DUMP, motoconformadora CAT 140B de 150HP, compactador autopropulsado CAT 815 con rodillo "pata de cabra" y el mismo modelo pero para rodillo liso, equipo PFAFF de cuña simple, planta de energía eléctrica de 5000 watt.*

## 6.3. Costos por Disposición

Antes de evaluar el costo por disposición, es necesario considerar los siguientes puntos:

- ◆ El sitio donde se realizará la obra se encuentra localizado fuera de la Ciudad de México.
- ◆ La distancia máxima entre el sitio y el banco de materiales es de 11 km.
- ◆ El sitio que se encuentra ya excavado tiene una superficie de 10,000 m<sup>2</sup>, con taludes 3:1 y 6m de profundidad.
- ◆ Se obtendrá el volumen disponible del sitio mediante la fórmula de una pirámide truncada:

$$\left( B + b + \sqrt{B \times b} \right) \frac{h}{3}$$

- ◆ Los precios de los geosintéticos que se presentan en el Apéndice 2 incluyen aranceles y fletes.
- ◆ Los precios están actualizados a octubre de 1997.

- ◆ Se analizarán sólo costos directos y no se consideran fletes de maquinaria pesada.
- ◆ No se evalúa el costo de los sistemas para monitoreo o extracción de lixiviados y biogás.

Para determinar los costos por disposición, es necesario relacionar los volúmenes disponibles en el sitio con los costos por la construcción del sistema, esto puede observarse con en la *tabla 6.9*, mostrada a continuación:

Combinación de Sistemas	Costo Directo	Volumen Disponible (m <sup>3</sup> )	Costo por Disposición (\$/m <sup>3</sup> )
<b>Convencional (OPS)</b>			
Tradicional	\$ 2,422,772.99	30,461.00	79.54
Alternativo	\$ 2,908,152.39	30,461.00	95.47
Compuesto	\$ 3,093,720.64	30,461.00	101.56
<b>Convencional</b>			
Tradicional	\$ 2,820,552.21	27,682.25	101.89
Alternativo	\$ 3,305,631.61	27,682.25	119.42
Compuesto	\$ 3,491,499.86	27,682.25	126.13
<b>Doble Barrera Natural- HDPE</b>			
Tradicional	\$ 3,811,433.42	21,974.32	173.45
Alternativo	\$ 4,296,812.82	21,974.32	195.54
Compuesto	\$ 4,482,381.07	21,974.32	203.98
<b>Doble Arena-HDPE</b>			
Tradicional	\$ 3,340,714.51	24,666.76	135.43
Alternativo	\$ 3,826,093.91	24,666.76	155.11
Compuesto	\$ 4,011,662.16	24,666.76	162.63
<b>Doble Bentonita-HDPE</b>			
Tradicional	\$ 4,033,112.52	28,202.66	143.01
Alternativo	\$ 4,518,491.92	28,202.66	160.22
Compuesto	\$ 4,704,060.17	28,202.66	166.80

*Tabla 6.9. Costos por combinación de sistemas*

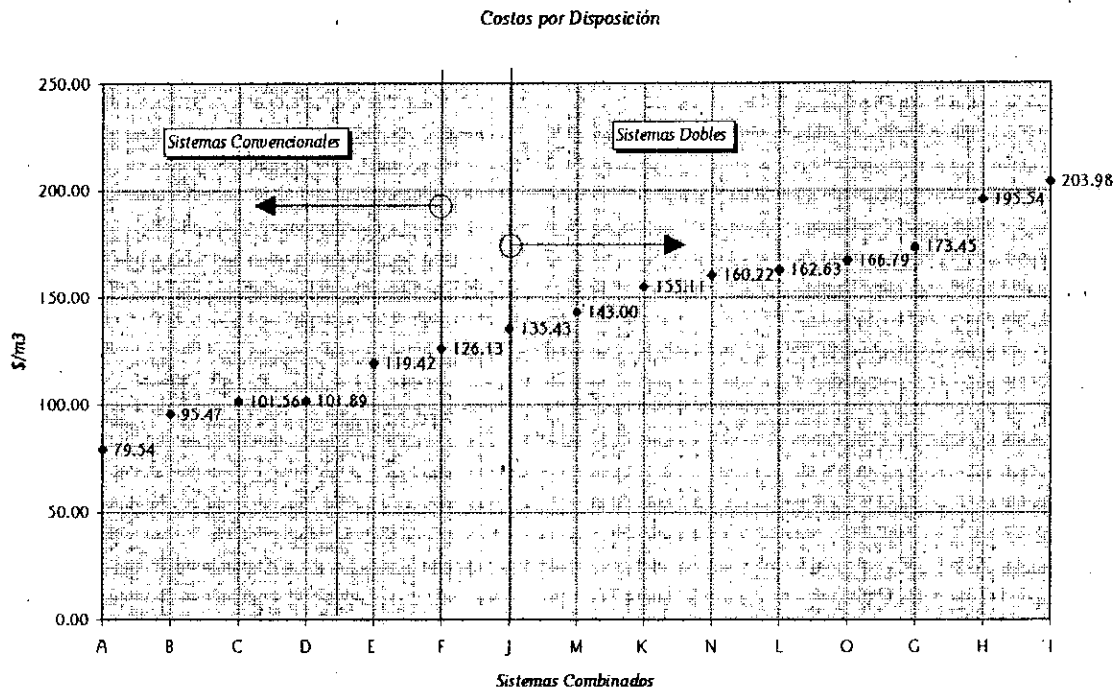
Para facilitar la comprensión de la información es recomendable pasar los valores a una gráfica. Antes de esto, se pondrán ordenar alfabéticamente los distintos sistemas combinados que se muestran. Así la tabla anterior se simplificará en la *tabla 6.10*.



Sistema Combinado	Clave	Costo por Disposición en la Posclausura (\$/m <sup>3</sup> )
Convencional (OPS) - Tradicional	A	79.54
Convencional (OPS) - Alternativo	B	95.47
Convencional (OPS) - Compuesto	C	101.56
Convencional - Tradicional	D	101.89
Convencional - Alternativo	E	119.42
Convencional - Compuesto	F	126.13
Doble Barrera Natural - HDPE - Tradicional	G	173.45
Doble Barrera Natural - HDPE - Alternativo	H	195.54
Doble Barrera Natural - HDPE - Compuesto	I	203.98
Doble Barrera Arena-HDPE - Tradicional	J	135.43
Doble Barrera Arena-HDPE - Alternativo	K	155.11
Doble Barrera Arena-HDPE - Compuesto	L	162.63
Doble Barrera Bentonita-HDPE - Tradicional	M	143.01
Doble Barrera Bentonita-HDPE - Alternativo	N	160.22
Doble Barrera Bentonita-HDPE - Compuesto	O	166.79

Tabla 6.10 Resumen de costos por sistemas combinados

La información anterior se muestra en la gráfica 6.1.

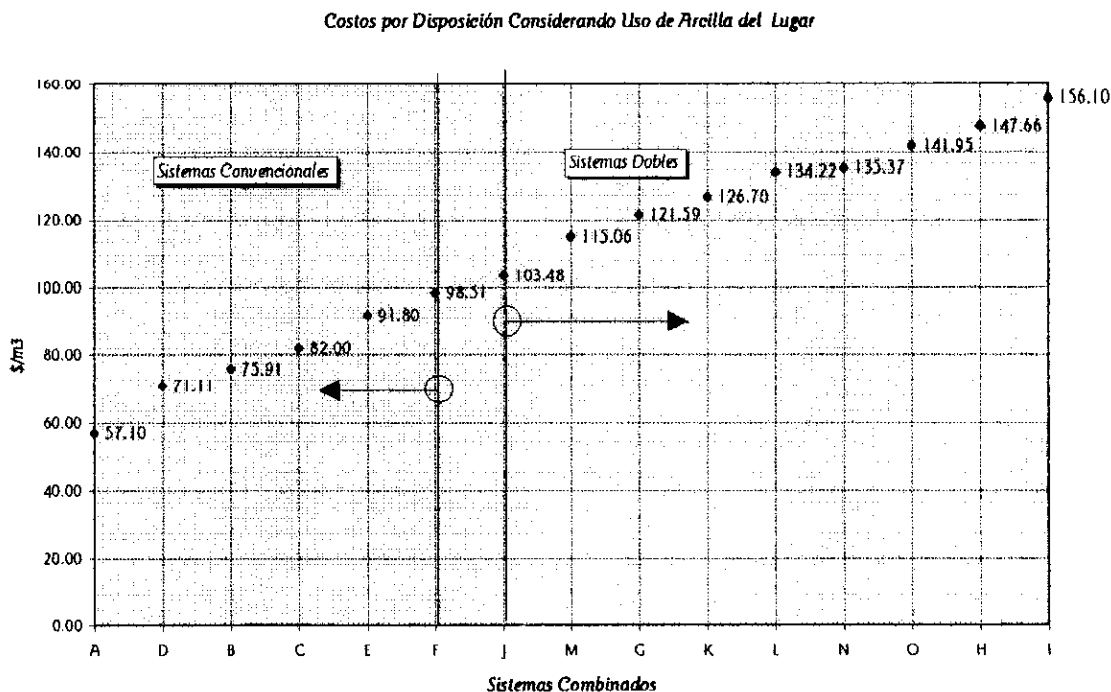


Gráfica 6.1 Costos por disposición considerando la adquisición de todos los insumos

De la información presentada en relación a los sistemas combinados se puede concluir que:

- ◆ La construcción de *barreras naturales incrementa los costos por disposición considerablemente*. Sin embargo, estos son los más estudiados y los que producen las permeabilidades más bajas cuando se utilizan con geomembranas.
- ◆ El uso de las geomembranas de HDPE en conjunto las barreras naturales, *disminuye los costos por disposición en más de un 25% en la evaluación de los sistemas combinados convencionales tradicionales contra los propuestos por la Organización Panamericana de la Salud (OPS)*.
- ◆ El uso de arena y geomembranas de HDPE en los sistemas dobles *representa una oportunidad aceptable desde la perspectiva económica, pero presenta un alto riesgo desde la perspectiva ambiental*, ya que cualquier rotura en la geomembrana facilitará un incremento en la permeabilidad de la primera barrera. Si además, se considera que los *sistema de cubierta tradicionales se dañan severamente con los asentamientos diferenciales*, la incertidumbre sobre la entrada de altas cantidades de agua será mayor en regiones con precipitaciones altas y medias.
- ◆ La combinación de geomembranas del tipo bentonita - HDPE y la cubierta alternativa; son una posibilidad real si se llevan a cabo las medidas pertinentes para evitar que la bentonita se dañe al entrar en contacto con los lixiviados. Al seleccionar un sistema eficiente en la cubierta, disminuyen las posibilidades de entrada de agua y por lo tanto de generación de lixiviados.

La situación es semejante si se consigue un lugar donde el material excavado sea arcilla que tenga las propiedades deseadas. Aunque los costos por disposición disminuyen en más de un 20% como se puede ver en la *gráfica 6.2*.



*Gráfica 6.2 Costos por disposición considerando la existencia de arcilla en el sitio de disposición*

La información detallada de las gráficas se muestra en el Apéndice 2.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Conclusiones:

En relación a las barreras naturales impermeables:

1. Es importante entender que en la mayoría de los países han sido dispuestos conjuntamente residuos sólidos municipales, industriales y peligrosos. Esto ocasionó aumentos en la permeabilidad de las barreras impermeables naturales, provocando la contaminación de suelos y acuíferos.
  2. En la parte que muestra el análisis de las capas impermeables naturales, las experiencias de distintos países señalan que:
    - ◆ Las capas de arcilla del grupo de la caolinita e ilita presentan menor daño ante lixiviados y residuos industriales, lo que retarda el flujo de lixiviados y otras sustancias. Las montmorinolitas, al ser más sensibles a estas sustancias, presentan fuertes aumentos en la conductividad hidráulica bajo las condiciones mencionadas anteriormente.
    - ◆ El éxito obtenido en Winsconsin, Estados Unidos, en relación a los rellenos sanitarios; se debió al tipo de arcilla utilizado, al control de calidad en la construcción de las barreras y al espesor de diseño que alcanzaban de 1.00 y 1.50m.
    - ◆ Es necesario controlar la carga hidráulica de los lixiviados ya que cuando las barreras se encuentran agrietadas, se provoca incremento en la permeabilidad de esta.
    - ◆ Es importante normar criterios para evaluar correctamente la impermeabilidad en campo y en laboratorio; en la mayoría de los casos, los datos del laboratorio no han indicado valores reales de conductividad hidráulica.
    - ◆ La mejor manera de medir la conductividad hidráulica de la barrera es realizando pruebas en campo.
    - ◆ Es importante revisar que no existan variaciones en las características de las arcilla al ser extraída, transportada, extendida y compactada.
    - ◆ Un equipo y procedimiento de compactación adecuado es fundamental para lograr el 95% de la prueba Proctor estándar. El rodillo "pata de cabra" ha proporcionado usualmente la compactación especificada.
    - ◆ La principal desventaja de la arcilla, es la disposición, el costo del material y el conseguir equipo necesario para realizar la construcción de las barreras.
    - ◆ La construcción de barreras impermeables permite establecer de manera precisa la cantidad y dirección de los flujos; esto no sucede cuando se utilizan como sitios de disposición suelos en estado natural, en los cuales se presentan en poca distancia variaciones en la conductividad hidráulica horizontal y vertical.
-

3. En relación a las geomembranas se concluye que:
  - ◆ Las geomembranas son una buena alternativa ya que presentan resistencia a más del 95% de las sustancias químicas presentes en los rellenos sanitarios y son más económicas que las barreras naturales impermeables.
  - ◆ Si se decide por este tipo de tecnología. Debe establecerse un adecuado sistema de aseguramiento y control de calidad.
  - ◆ Es indispensable proteger a las geomembranas de los rayos solares, equipo pesados y objetos punzantes.
  - ◆ Debe evitarse que la geomembrana se someta a fricción excesiva; en caso de sospecha colocará un geotextil para la protección de esta.
  - ◆ Presentan problemas en la fricción con los suelos del relleno, por lo que en ocasiones es necesario incluir algún tipo de geosintético que auxilie en la estabilidad del suelo.
  - ◆ Existen problemas por falta de adherencia entre la capa artificial y los suelos cuando los taludes son mayores de 2.5:1.
  - ◆ En caso de que exista alguna falla o perforación en la geomembrana, los lixiviados inmediatamente entrarán en contacto con el siguiente tipo de suelo, incrementando la conductividad hidráulica en el sistema.
  - ◆ En el caso específico de las geomembranas de bentonita, debe consultarse con el fabricante las características de saturación que se requieren para impedir el paso de los lixiviados; un error en esta especificación provoca un considerable aumento en la conductividad hidráulica.
4. En lo referente a sistemas de cubierta se tienen los siguientes puntos:
  - ◆ El sistema de cubierta es tan importante como el sistema de barrera en la base, ya que además de evitar la infiltración disminuye la contaminación del agua de lluvia.
  - ◆ Se requiere evaluar la posibilidad de asentamientos diferenciales y en su caso diseñar y construir para tal fin.
  - ◆ Es conveniente revisar la factibilidad de la aplicación de las nuevas tecnologías según las condiciones de cada lugar.
5. El diseño y construcción utilizando conjuntamente barreras naturales y artificiales implica costos mayores por disposición, pero también significa un lugar más seguro para disponer los residuos sólidos municipales.
6. Es indispensable analizar las condiciones climáticas del lugar para seleccionar adecuadamente la combinación de sistemas a utilizar. Aunque regularmente el factor económico influye en la toma de decisiones, éste no puede justificar los daños que ocasionará al ser humano y al ambiente.
7. Se requiere visualizar el funcionamiento de los sistemas de base y cubierta como un sistema en conjunto para establecer el funcionamiento que tienen, considerando las características particulares del sitio.
8. En lo referente al control de residuos se tiene que:

8. En lo referente al control de residuos se tiene que:
- ◆ Según estudios realizados en distintos países, la producción de residuos por habitante aumenta paulatinamente. Aunque el relleno sanitario es parte integral en los sistemas de manejo de residuos, la mejor alternativa para evitar riesgos en la pérdida de recursos es desarrollar programas de educación ambiental enfocados a la recuperación, reciclaje y composteo de residuos.
9. Las normas mexicana para la construcción de rellenos sanitarios presenta los siguientes problemas:
- ◆ No fomenta la calidad en la construcción de las capas impermeables, los valores de los parámetros que establece son muy altos, lo que facilita el flujo de lixiviados a través de las barreras.
  - ◆ No establece requisitos mínimos de diseño a cumplir para la construcción de un relleno sanitario, como lo establecen las legislaciones de diversos países;
  - ◆ Se desconocen los diferentes problemas que se han generado en varios países por la disposición inadecuada y mala calidad de construcción de los rellenos sanitarios; sólo en los Estados Unidos existen más de 2000 tiraderos construidos entre 1940 y 1980, con graves problemas de salidas de lixiviados debido a la inadecuada construcción y diseño de las capas impermeables, sistemas de cubierta y drenaje.
  - ◆ No exige la aplicación de los sistemas de control de calidad para la construcción del sitio.
  - ◆ No presenta claridad en lo relacionado a responsabilidad de la construcción y operación del relleno.
  - ◆ No establece responsabilidades, es decir, no indica la obligación de pagos y reparaciones de daños en caso de que el relleno sanitario dañe recursos del país.
  - ◆ No menciona el tratamiento o uso que se les dará a los lixiviados.
  - ◆ No menciona el uso que se le dará al material recuperado, ni el manejo de los recursos que se obtengan por la venta de éste.
  - ◆ En caso de concesionarse, no se indica que institución supervisará constantemente al sitio, ni establece mecanismos que eviten complicidad entre las autoridades y el operador.
  - ◆ Sólo establece la protección del acuífero, no del suelo del lugar donde se coloca el relleno sanitario, este se considera como parte del sistema de barrera.

En general, en lo relacionado a las Normas Oficiales Mexicanas se tiene que:

- ◆ Fomenta un negocio lucrativo.
  - ◆ No exige responsabilidad, ni capacidad técnica a quién se encargue de la construcción de un relleno sanitario.
  - ◆ No existe supervisión constante en lo relacionado a la construcción y operación del sitio.
-

## Recomendaciones:

1. Para la construcción de barreras construidas a base de arcillas:
  - ◆ Construir terraplenes de prueba para establecer un correcto procedimiento de construcción.
  - ◆ Proteger la barrera impermeable natural con otra capa de compactación, construida mediante un rodillo liso de tal forma que funcione como una "costra", la cual debe evitar la pérdida de humedad.
  - ◆ Establecer extracciones constantes del lixiviado en la base del relleno, evitando que se presenten cargas hidráulicas del lixiviados mayores a 30cm ya que eso propicia el aumento de la conductividad hidráulica en las barreras.
  - ◆ Considerar el tipo de mineral que tiene la arcilla que se utilizará para la construcción de las capas.
  - ◆ Establecer la granulometría y cantidades de la grava y arena que se utilizarán para la construcción de la capa.
2. Si se decide a utilizar geomembranas:
  - ◆ Revisar constantemente el desarrollo de las nuevas tecnologías en geomembranas. Principalmente en el polietileno de mediana y baja densidad.
  - ◆ Revisar que no existan fallas en las geomembranas, para evitar aumento en el flujo del lixiviado.
  - ◆ Cubrir las geomembranas con una barrera húmeda de 10 a 20 cm. de arcilla o arena sin compactar (o en su caso algún geotextil), para disminuir la posibilidad de daños.
  - ◆ Revisar el sistema de unión a utilizar, evaluando las características de la geomembrana.
3. En general, es necesario que:
  - ◆ Antes de elegir algún geotextil, geomalla o geored, deben considerarse las desventajas que representa su uso. Principalmente, en lo relacionado a la disminución de la conductividad hidráulica; debido a la presencia de depósitos y desarrollo de grandes cantidades de nódulos bacterianos.
4. Revisar las diferentes alternativas que se presentan con la aplicación de nuevas tecnologías que pueden traducirse en beneficios económicos.
5. En las regiones de medianas y altas precipitaciones es recomendable utilizar los sistemas de doble barrera, se recomienda el construido mediante barreras naturales de arcilla de baja compresibilidad y de geomembranas de polietileno de alta densidad (o algún otro tipo de geomembrana). Este tipo de sistema proporciona mayor certeza en cuanto al control del flujo de lixiviados.
6. En regiones con baja precipitación pluvial pueden utilizarse los sistemas convencionales, preferentemente el de la Organización Panamericana de la Salud. Antes de construir el sistema

de cubierta. Se requiere evaluar la cantidad mínima de agua para conseguir que la degradación de los residuos se realice correctamente.

7. Aunque tienen costos elevados, los sistemas alternativo y compuesto, presentan mayor eficiencia al disminuir la entrada de agua al sistema, lo que los hace más seguros.
  8. Evaluar el funcionamiento de los sistemas en conjunto; documentarlos, revisarlos y establecer plan de acciones correctivas.
  9. Para disminuir la cantidad de lixiviados, hay que aumentar la altura de las celdas semanales o mensuales y disminuir el área que estará en contacto con las precipitaciones. Es importante considerar los períodos de lluvia y estiaje para el diseño de las celdas.
-

**BIBLIOGRAFÍA**

1. Aburto, R. y Chavarri, C. 1990. Movimiento de Tierras. Fundec, A.C.
  2. American Society of Civil Engineers (ASCE). 1990. Waste Containment Systems: Construction, Regulation and Performance. Edited by Rudolph Bonaparte.
  3. American Society for Testing (ASTM). 1990. Geotechnics of Waste Fills: Theory and Practice. Edited by Arvid Landva and David Knowles.
  4. ANSI y NSF. 1991. Flexible Membrane Liners American National Standard / NSF International Standard.
  5. Bagchi, A. 1989. Design , Construction and Monitoring of Sanitary Landfill. John Wiley and Sons.
  6. Bronstein, D. 1993. Demystifying the Law. Lewis Publishers.
  7. Committee D-35 on Geosynthetics. 1993. ASTM Standards on Geosynthetics. ASTM.
  8. Construction Market Data Group. 1997. Catálogo Bimsa de octubre de 1997. Construction Market Data Group.
  9. COVITUR. 1991. Manual de Diseño Geotécnico. COVITUR.
  10. Cuyás, A., Brett, L. And Eaton H. 1966. Appleton's New Cuyás Dictionary: Inglés - Español. Grolier, Inc.
  11. Cheng, L. and Evett, J. 1992. Soils and Foundations. Prentice Hall.
  12. Daniel, E. 1993. Geotechnical Practice for Waste Disposal. Edited by David E. Daniel.
  13. Day, D. 1992. Biblioteca del Ingeniero Civil. Noriega- Limusa.
  14. Day, D. 1978. Maquinaria para Construcción. CECSA.
  15. Day, R. 1996. Cómo Escribir y Publicar Trabajos Científicos. Organización Panamericana de la Salud.
  16. De Alba, A. y Mendoza, E. 1988. Factores de Consistencia de Costos y Precios Unitarios. Fundec, A.C.
  17. Departamento del Distrito Federal. 1994. Ley de obra Pública. Departamento del Distrito Federal.
  18. Dowden, L. and McNurney, J. 1994. Municipal Enviromental Compliance Manual. Lewis Publishers.
  19. Etienne, G. and Sedlak, C. 1987. Inglés Técnico y Científico. Limusa.
  20. Gabay, A. 1974. Maquinaria para Obras. Blume-Labor.
  21. García-Pelayo, R. 1983. Larousse: English-Spanish. Ediciones Larousse.
  22. Garza, A. 1994. Manual de Técnicas de Investigación para Estudiantes de Ciencias Sociales. El Colegio de México.
-



23. Geotechnical Fabrics Report (GFR). 1996. Specifier's Guide. GFR.
24. Goldman, L., Greenfield, L., Damle, A., Northeim, C., Kingsbury, G. and Truesdale, R. 1990. Clay Liners for Waste Management Facilities. Noyes Data Corporation.
25. The Industrial Fabrics Association International (IFAI). 1990. A Design Primer: Geotextiles and Related Materials. IFAI.
26. Diario Oficial de la Federación. 1988. Ley General del Equilibrio Ecológico y de Protección al Ambiente. Diario Oficial de la Federación del 28 de enero de 1988.
27. Diario Oficial de la Federación. 1996. Reformas, Adiciones y Derogaciones a la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. Diario Oficial de la Federación del 13 de diciembre de 1996.
28. Jaramillo, J. 1991. Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales. Organización Panamericana de la Salud.
29. Kays, W. 1986. Construction of Linings for Reservoirs, Tanks, and Pollution Control Facilities. John Wiley and Sons.
30. Koerner, R. 1986. Designing with Geosynthetics. Prentice Hall.
31. Kubasek, N. and Silverman G. 1994. Environmental Law. Lewis Publishers.
32. LaGrega, M., Buckingham, P., and Evans, J. 1994. Hazardous waste management. McGraw Hill.
33. Landreth, R. and Rabers, P. 1997. Municipal Solid Waste Problems and Solutions. Edited by Landreth, R. and Rabers, P.
34. Leet, F. y Judson S. 1986. Fundamentos de Geología Física. Limusa.
35. Mackenthun, K. and Bregman, J. 1992. Environmental Regulations Handbook. Lewis Publishers.
36. Merrit, S. 1984. Manual del Ingeniero Civil. McGraw-Hill.
37. Mc Bean, E., Rovers, F. and Farquhar G. 1995. Solid Waste Landfill Engineering and Design. Prentice Hall.
38. McGregor, G. 1994. Environmental Law and Enforcement. Lewis Publishers.
39. The North American Geosynthetics Society (NAGS), The Industrial Fabrics Association International (IFAI) e International Geosynthetics Society (IGS). 1993. Geosynthetics '93, Vol 2: Conference Proceedings. NAGS, IFAI e IGS.
40. NAGS, IFAI and IGS. 1995. Geosynthetics '95, Vol 2: Conference Proceedings. NAGS, IFAI e IGS.
41. Nichols, H. 1985. Movimiento de Tierras. CECSA.
42. Office Solid Waste and Emergency Response U.S. Environmental Protection Agency. 1991. Technical Guidance Document: Inspection Techniques for the Fabrication of Geomembrane Field Seams. USEPA.
43. Oweis, I., and Khera, R. 1990. Geotechnology of Waste Management. Butterworths.
44. Peck, R., Hanson, W., y Thornburn T. 1982. Ingeniería de Cimentaciones. Limusa.
45. Rico, A, y Del Castillo, H. 1974. La ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres Vol. 1. Limusa.

46. Rico, A, y Del Castillo, H. 1974. La ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres Vol. II. Limusa.
  47. SEDUE. 1985. Manual de Rellenos Sanitarios. SEDUE.
  48. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS). 1989. Construcción Especializada en Geotecnia. SMMS.
  49. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS). 1991. Geotecnia Ambiental. SMMS.
  50. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS). 1992. Geosintéticos. SMMS.
  51. Staff Industries, Inc. 1993. The Use of PVC, CPE and Reinforced Hypalon in Civil Engineering Containment Applications. Staff Industries, Inc.
  52. Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Eliassen, R. 1977. Solid Wastes: Engineering Principles and Management. McGraw Hill.
  53. Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Eliassen, R. 1994. Integral Solid Waste Management. McGraw-Hill.
  54. Testa, S. 1993. Geological Aspects of Hazardous Waste Management. Lewis Publishers.
  55. USEPA. 1991. Technical Guidance Document: Inspection Techniques for the Fabrication of Geomembrane Field Seams. USEPA.
  56. Vesilind, P. Hartman, G. and Skene, E. 1986 Sludge Management and Disposal for the Practicing Engineering. Lewis Publishers.
-

**ARTÍCULOS**

1. Alwahab, R. and Al-Ourna, H. 1995. Fiber Reinforced Cohesive Soils for Application in Compacted Earth Structures. NAGS, IFAI e IGS.
2. Barrera, J. 1994. Desarrollo Institucional. Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos, A.C. (AMCRESPEC).
3. Benson, C., Tinjum, J. and Hussin, C. 1995. Leakage Rates from Geomembrane Liners Containing Holes. NAGS, IFAI e IGS.
4. Berg, R. and Collin, J. 1993. Design of Landfill Liners Over Yielding Foundations. NAGS, IFAI e IGS.
5. Boardman, B. and Daniel, D. 1996. Hydraulic Conductivity of Desiccated Geosynthetic Clay Liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE.
6. Bonaparte, R. and Gross, B. 1990. Field Behavior of Double-Liner Systems. ASCE.
7. Bowders, J. and Gabre, M. 1995. In Situ Liner System Using Remote Longwall Mining Technique. NAGS, IFAI e IGS.
8. Broderick, G. and Daniel, D. 1990. Stabilizing compacted clay against chemical attack. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE.
9. Comer, A. and Dewey, R. 1993. Bureau Reclamation Experiences Lining the Rough Subgrade at Black Lake Dam. NAGS, IFAI e IGS.
10. Daniel, D. 1990. Summary Review of Construction Quality Control for Earthen Liners. American Society of Civil Engineers (ASCE).
11. Daniel, D. 1990. Review of Construction Quality Control for Compacted Soil Liners, ASCE.
12. Daniel, D., Shan, H. and Anderson, J. 1993. Effects of Partial Wetting on the Performance of the Bentonite Component of a Geosynthetic Clay Liners. NAGS, IFAI e IGS.
13. Darilek, G., Menzel, R. and Johnson, A. 1995. Minimizing Geomembrane Liner Damage While Emplacing Protective Soil. NAGS, IFAI e IGS.
14. Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA. 1994. Report of Technical Committee on Environmental Control (T5), Colorado State University.
15. Dávila, A. 1994. Sistemas de Control en la Operación de los Rellenos Sanitarios. Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos, A.C. (AMCRESPEC).
16. Dobras, T. and Elzea, J. 1993. In-Situ Soda Ash Treatment for Contaminated Geosynthetic Clay Liners. NAGS, IFAI e IGS.
17. Drushel, S. and Underwood, E. 1995. Designing of Lining and Cover System Side Slopes. NAGS, IFAI e IGS.
18. Estrada, R. 1994. Estudios Previos para Rellenos Sanitarios. Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos, A.C. (AMCRESPEC).

19. Elsbury, B., Daniel, D., Sraders, A. and Anderson, D. 1990. Lessons learned from compacted clay liner. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE.
  20. Evans, J. 1991. *Geotechnics of Hazardous Waste Control Systems*. Bucknell University.
  21. Feeney, M. and Maxson, A. 1993. Field Performance of Double-Liner System in Landfills. NAGS, IFAI e IGS.
  22. Giround, J. and Paggs, I. 1990. *Geomembrane Construction Quality Assurance*. ASCE.
  23. Gleason, M., Daniel, D., and Eykholth, G. 1997. *Calcium and Sodium Bentonite for Hydraulic Containment Applications*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE.
  24. Gordon, M., Huerbner, P. and Mitchell, G. 1990. Regulation, Construction and Performance of Clay - Liner Landfill in Wisconsin. ASCE.
  25. Guido, V., Aprile, J. and Sabalis, P. 1993. The Effect of Randomly Dispersed Fibergrid Reinforcement on the California Bearing Ratio of Soils. NAGS, IFAI e IGS.
  26. Hsuan, Y., Yim, G. and Koerner, R. 1993. Evaluation of Geomembranes Made from Different Blends of Polyethylene. NAGS, IFAI e IGS.
  27. Johnson, G., Crumbley, W. and Boutwell, G. 1990. Field Verification of Clay Liners Hydraulic Conductivity. NAGS, IFAI e IGS.
  28. Koerner, R., Helse, and Lord, A. 1990. Long-Term Durability and Aging of Geomembranes. ASCE.
  29. Kraus, J., Benson, C., Erickson, A., and Chamberlain, E. 1997. Freeze-Thaw Cycling and Hydraulic Conductivity of Bentonite. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE.
  30. LaGatta, M., Boardman, B., Cooley, B., and Daniel, D. 1997. Geosynthetic Clay Liners Subjected to Differential Settlement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE.
  31. Landreth, R. 1990. *Landfill Containment Systems Regulations*. ASCE.
  32. Lechner, P. 1994. Water Balance and Leachate Quantity. *Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos, A.C. (AMCRESPEC)*.
  33. López, F. 1994. *Diseño del Relleno Sanitario y Obras Complementarios*. *Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos, A.C. (AMCRESPEC)*.
  34. Marcotte, M., Rollin, A., Lagace, S. and Denis L. 1993. *Assessment of Hot Air Fusion Welding for HDPE Geomembranes*. NAGS, IFAI e IGS.
  35. Marsal, R. y Reséndiz, D. 1968. Compactación de Suelos Arcillosos: Propiedades Mecánicas de Suelos Arcillosos Compactados. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
  36. McBrayer, M., Mauldon, M., Drumm, E. and Wilson, G. 1997. Infiltración Test on Fractured Compacted Clay Liners. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE.
  37. Michelangeli, A. 1995. Italian Experience with HDPE Geomembrane in Landfill Lining. NAGS, IFAI e IGS.
  38. Mitchell, J. 1982. *Soil Improvement - Its Past, and Prospects for the Future*. SMMS.
-

39. Mitchell, J. 1982. Soil Improvement- State of the Art Report. ICSMFE.
40. Mitchell, J. and Jaber, M. 1990. Factor Controlling the Long-Term Properties of Clay Lyners. ASCE.
41. Ortega, A. 1994. Modelos de Predicción de Movimientos de Contaminantes. Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos, A.C. (AMCRESPEC).
42. Paris, I. 1994. Landfill Course Geological Aspect. Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos, A.C. (AMCRESPEC).
43. Ruhl, J., and Daniel, D. 1997. Geosynthetic Clay Liners Permeated with Chemical Solutions and Leachates. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE.
44. Sánchez, J. 1994. Metodología para el Emplazamiento de Rellenos Sanitarios. Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos, A.C. (AMCRESPEC).
45. Sharma, H. and Hullings, D. 1993. Direct Shear Testing for HDPE / Amended Soil Composit. NAGS, IFAI e IGS.
46. Smith, M. 1995. The Gilt Edge Asphalt Leach Pad. NAGS, IFAI e IGS.
47. Solórzano, G. 1994. Legislación Mexicana en Materia de Rellenos Sanitarios. Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos y Peligrosos, A.C. (AMCRESPEC)
48. Taylor, R. and Schader, L. 1993. Geomembrane Floating Covers: Technology for the Nineties. NAGS, IFAI e IGS.
49. Thiel, R. and Stewart, M. 1993. Geosynthetic Landfill Cover Design Methodology and Construction Experience in the Pacific Northwest. . NAGS, IFAI e IGS.
50. Trast., and Benson, G. 1995 . Estimating Field Hidraulic Constructivity of Compacted Clay. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE.
51. Trautwein, S. and Williams, C. 1990. Performance Evaluation of Earthen Liners. ASCE.
52. Tremblay, M. and Bedard, C. 1995. Encapsulation of Acid Generating Mine Waste Suing a Sloped Terrain at Weedon, Quebec. NAGS, IFAI e IGS.
53. Weiss, W., Siegmund, M. and Alexiew, D. 1995. Field Performance of a Geosynthetic Clay Liner Landfill Capping Sistem Under Simulated Waste Subsidence. NAGS, IFAI e IGS.
54. Well, W. 1995. Guidance for Design of Watertight Geomembrane Attachment to Concrete Surfaces. NAGS, IFAI e IGS.
55. Wilson-Fahmy, R. and Koerner, R. 1995. Leake Rates Through Holes in Geomembranes Overlying Geosynthetic Clay Liners. NAGS, IFAI e IGS.

#### INTERNET

1. Gopher:// gopher.epa.gov:70/100/ Offices/Waste/OSWRCRA/non-hw/muncpl/criteria/landbig
2. <http://www.study.engr.WISC.EDU/II/course/landfill/course>.
3. [http://www.epa.gov/docs/OSWRCRA/non-hw/muncpl/Municipal Solid Waste](http://www.epa.gov/docs/OSWRCRA/non-hw/muncpl/MunicipalSolidWaste).

## GLOSARIO

### *Biogás.*

La mezcla de gases producto de la descomposición biológica de la fracción orgánica de los residuos sólidos.

### *Celda.*

El bloque unitario de construcción de un relleno sanitario.

### *Celda Diaria.*

Las áreas definidas donde se esparcen y compactan los residuos sólidos durante un día, siendo cubiertos al final del mismo, con una capa de algún material que en caso de ser suelo, también se compacta.

### *Cubierta Final.*

El revestimiento de material natural o sintético que confina el total de las capas de que consta un relleno sanitario.

### *Disposición Final.*

Es la acción de depositar permanentemente los residuos en sitios y condiciones adecuadas para evitar daños al ambiente.

### *Encapsulado.*

Masa de suelo rodeada completamente por un geosintético utilizado como separador o barrera.

### *Geomalla.*

Material formado por dos grupos de filamentos gruesos paralelos que se intersectan en ángulos de 60 y 90°, se emplean para separación de materiales o para filtración y drenaje.

### *Geomembrana.*

Recubrimiento sintético impermeable a fluidos y partículas que se utilizan en ingeniería geotécnica.

### *Geosintético.*

Producto elaborado con polímeros para su uso en obras geotécnicas, que comprende los geotextiles, las geomembranas y otros productos relacionados.

### *Geored.*

Material fabricado por perforación de hojas de polímero que se someten a estiramiento en una o dos direcciones, o formados por dos grupos de elementos paralelos de polímero sometidos a estiramiento y cuya función es reforzar el suelo.

---

**Geotextil.**

Material flexible y permeable a los fluidos capaz de retener partículas de suelo mayores que el tamaño de sus poros, o proporcionar refuerzo, diseñado y fabricado para trabajos de ingeniería civil.

**Lixiviado.**

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

**Material de Cubierta.**

La capa de material natural o sintético con que se cubre una franja o capa de residuos en un relleno sanitario.

**Monómero.**

Molécula que se une con otras de su tipo para formar polímeros.

**Percolación.**

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

**Polímero.**

Material formado por macromoléculas construidas por cadenas largas de moléculas base denominadas monómeros, que se unen entre sí, generalmente a partir de reacciones químicas de polimerización.

**Posclausura**

Período de tiempo posterior al cierre del relleno sanitario.

**Preclausura.**

Período de tiempo anterior al cierre del relleno sanitario.

**Residuo Sólido Municipal.**

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

---



# **APÉNDICE I**



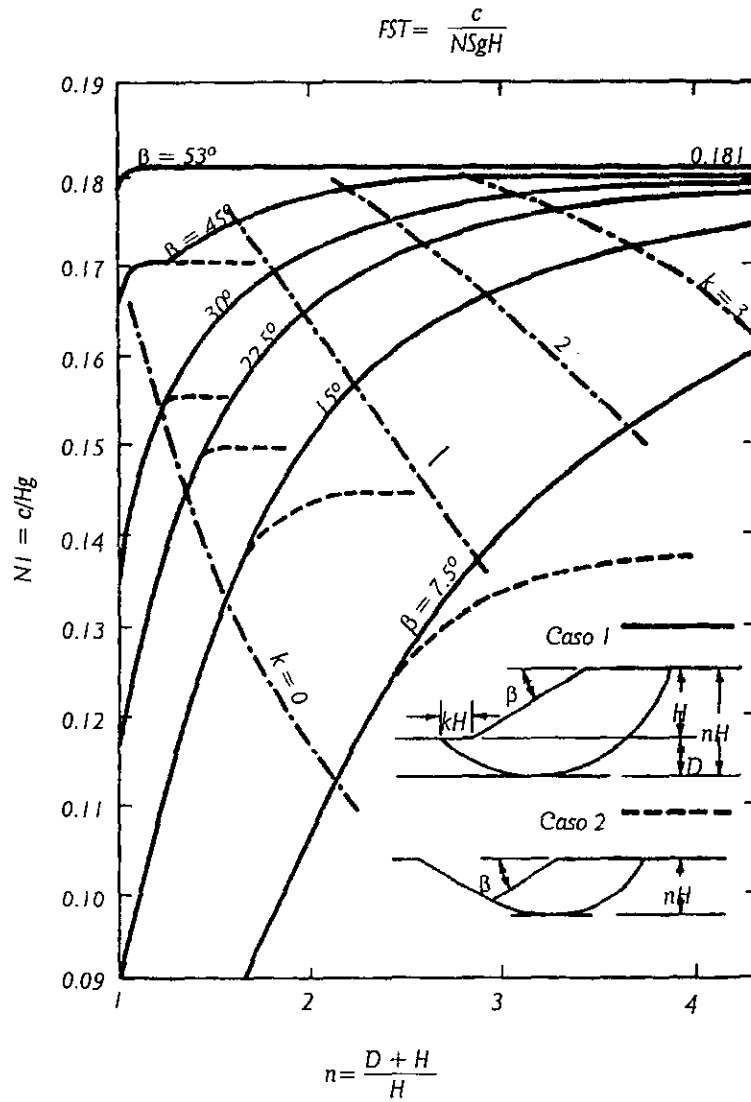


Fig. A.1.1. Curvas de estabilidad para suelos cohesivos.  
(Referencia: 30 - Koerner, R. 1986.)

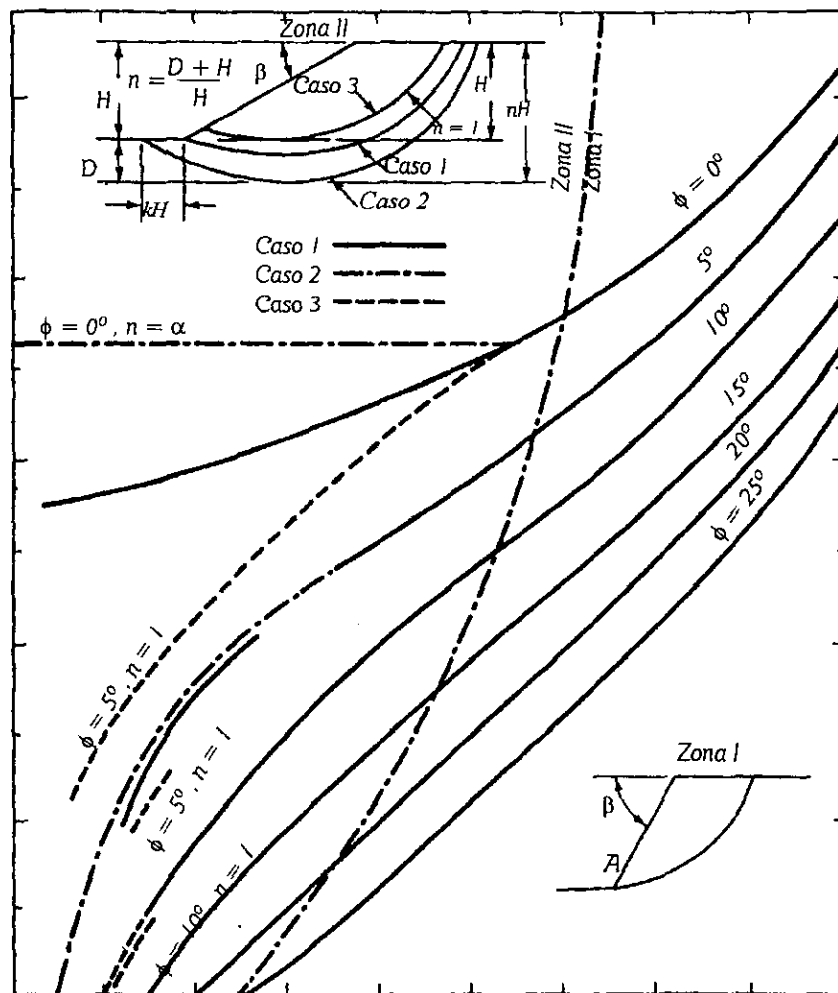


Fig. A.1.2. Curvas de estabilidad para suelos con cohesión y fricción.  
Referencia: 30 - Koerner, R. 1986.



# **APÉNDICE 2**

**COSTOS  
POR  
ACTIVIDADES**

### Análisis del Costo Directo de las Actividades que se Relacionan con la Construcción

#### Consideraciones:

- ◆ El sitio de disposición se encuentra a la salida de la Ciudad de México, sobre terreno plano.
- ◆ El banco de materiales se encuentra localizado a una distancia máxima de 11 km del lugar donde se construye el relleno sanitario y las vías de comunicación para la transportación están en buenas condiciones.
- ◆ El costo de las geomembranas de Polietileno de Alta Densidad es de 3.50 y 3.25 dólares/m<sup>2</sup> para espesores de 1.50 y 1.00 mm respectivamente.
- ◆ al que hay que incrementar un 3% de aranceles y un 15% de flete por transportación hasta el D.F.
- ◆ Los costos para georedes y geomallas 4 dólares/m<sup>2</sup> (incluye aranceles y fletes).
- ◆ El material considerado para la excavación es semiduro y se depositará en un lugar a menos de 1 km del sitio de construcción del relleno.

- 1000) Extracción, Carga y Acarreo de Material
  - 2000) Despalme y Limpieza
  - 3000) Trazo y Nivelación
  - 4000) Material Tendido en Capas de 20 cm.
  - 5000) Incorporación de Agua
  - 6000) Compactación del Material en la Base
  - 6100) Compactación del Material en el Talud
  - 7000) Escarificación de Capas Compactadas
  - 8000) Compactación de la Capa Protectora
  - 9000) Colocación de la Geomembrana de Polietileno de Alta Densidad
  - 10000) Colocación de la Geomembrana de Bentonita
  - 11000) Colocación de la Geomalla
  - 12000) Colocación de la Geored
-

Actividades a realizar para la Construcción de los Sistemas de Barreras y de Cubierta

1000) Extracción, Carga y Acarreo.

Extracción y Carga.		551.11	\$/hr
Costo Horario de la Retroexcavadora.		1.00	
Eficiencia Promedio ( $E_p$ )		1.00	
Profundidad de Corte ( $P_c$ )		1.00	
Ángulo de Giro ( $A_G$ )		0.90	
Cargabilidad del Material ( $C_M$ )			
Cucharón de 1.43m <sup>3</sup>		145.00	m <sup>3</sup> /hr
Producción ( $P_R$ )			
Producción Horaria Ajustada ( $P_{HA}$ )		130.50	m <sup>3</sup> /hr
$P_{HA} = E_p \times P_c \times A_G \times C_M \times P_R$			
Costo de la Producción:		(551.11 \$/hr / 130.50m <sup>3</sup> /hr)	4.22 \$/m <sup>3</sup>

Acarreo del Material Suelto en Camión de Volteo Durante el Primer kilómetro.		75.98	\$/hr
Costo Horario del Camión de Volteo:		7.00	m <sup>3</sup>
Capacidad de la Caja		1.00	
Coeficiente de Llenado		(7m <sup>3</sup> x 1.00)	7.00 m <sup>3</sup>
Volumen Real de la Caja Llena			

Duración del Ciclo de Ida y de Regreso Durante el Primer kilómetro. incluye Tiempos de Carga, Descarga y ...			
Lleno, Velocidad de Ida 30 km/hr	(1 km / 30 km/hr) x (60min/hr)	2.00	min
Vacío, Velocidad de Regreso 40 km/hr	(1 km / 40km/hr) x (60min/hr)	1.50	min
Tiempo de Carga	(7m <sup>3</sup> / 130m <sup>3</sup> /hr) x (60min/hr)	3.22	min
Tiempo de Descarga		1.00	min
Maniobras y Acomodos		2.00	min
Total		9.72	min
Rendimiento del Acarreo en el Primer kilómetro	7m <sup>3</sup> x (60min/hr / 9.72min)	43.20	m <sup>3</sup> /hr
Costo del Acarreo en el Primer kilómetro (material medido suelto)	(75.98 \$/hr / 43.20 m <sup>3</sup> /hr)	1.76	\$/m <sup>3</sup>

Acarreo del Material Suelto Durante los 10 km Subsecuentes			
Duración del Ciclo de Ida y Regreso Durante los 10 km.			
Lleno, Velocidad de Ida 20km/hr:	(10km / 20km/hr) x 60min/hr	30.00	min
Vacío, Velocidad de Regreso 30km/hr:	(10km / 30 km/hr) x 60min/hr	20.00	min
Rendimiento del Acarreo:	7m <sup>3</sup> x (60min/hr / 50 min)	8.40	m <sup>3</sup> /hr
Costo del Acarreo Durante los 10 km Subsecuentes (material medido suelto)	(75.98 \$/hr / 8.40 m <sup>3</sup> /hr)	9.05	\$/m <sup>3</sup>

Resumen del inciso 1000			
Extracción y carga			
Acarreo en el primer kilómetro			
Acarreo Durante los kilómetros Subsec..			

4.22	\$/m <sup>3</sup>
1.76	\$/m <sup>3</sup>
9.05	\$/m <sup>3</sup>

**2000) Despalme y Limpieza.**

Tractor D7		270.48	\$/hr
Producción (P <sub>R</sub> )		250	m <sup>3</sup> /hr
Operador(O <sub>p</sub> )		0.80	
Material(M <sub>A</sub> )		0.80	
Eficiencia de Trabajo(E <sub>T</sub> )		0.80	
Cuchilla Empujadora(C <sub>E</sub> )		0.60	
Pendiente(P)		1.00	
Producción Horaria Ajustada (P <sub>A</sub> )			
$P_{HA} = O_p \times M_A \times E_T \times C_E \times P$	250m <sup>3</sup> /hr (0.8 x 0.8 x 0.8 x 0.6 x 1.0)	76.80	m <sup>3</sup> /hr
Costo del Equipo	(270.48 \$/hr / 76.80 m <sup>3</sup> /hr)	3.52	\$/m <sup>3</sup>
Cuadrilla de 1 peón	(78.89 \$/jor / 92.50m <sup>3</sup> /jor)	0.85	\$/m <sup>3</sup>
Costo del Despalme y Limpieza		4.37	\$/m <sup>3</sup>

**Resumen del inciso 2000**  
**Despalme y Limpieza**

**4.37 \$/m<sup>3</sup>**

**3000) Trazo y Nivelación**

Tránsito para Medición CH5		10.01	\$/hr
Nivel para Medición K-E DUMPY		9.53	\$/hr
Costo del Equipo	(19.54\$/hr x 8hr/jor x 2jor/10000m <sup>2</sup> )	0.03	\$/m <sup>2</sup>
Cuadrilla (1 aux. topog. y 4 cadeneros)		423.29	\$/jor
Costo de la Cuadrilla	(2.5 jor x 423.29\$/jor)/10000m <sup>2</sup>	0.11	\$/m <sup>2</sup>
Materiales			
Duela 3/4" x 4" x 8'	(2.88pt x 3.83\$/pt)/10000m <sup>2</sup>	0.00	\$/m <sup>2</sup>
Barrote 2" x 4" x 8 1/4'	(4.33pt x 3.63\$/pt)/10000m <sup>2</sup>	0.00	\$/m <sup>2</sup>
Polín 4" x 4" x 8 1/4'	(5.77pt x 2.75\$/pt)/10000m <sup>2</sup>	0.00	\$/m <sup>2</sup>
Calhira	(35kg x 1\$/kg) / 10000m <sup>2</sup>	0.00	\$/m <sup>2</sup>
Esmalte	(0.3 l x 37.39\$/l) / 10000m <sup>2</sup>	0.00	\$/m <sup>2</sup>
Hilo Plástico	(30m x 0.10\$/m)/10000m <sup>2</sup>	0.00	\$/m <sup>2</sup>
Costo de Materiales		0.01	\$/m <sup>2</sup>

**Resumen del inciso 3000**  
**Trazo y Nivelación**

**0.15 \$/m<sup>2</sup>**

**4000) Material Tendido en Capas de 20 cm.**

Costo Horario de la Motoconformadora:		360.21	\$/hr
Ancho de la Cuchilla		3.60	m
Traslape		20.00	%
Ancho Efectivo:	(3.96m x 0.80)	3.17	m
Ancho del Tramo		15.00	m
Número de Pasadas	(15m / 3.17m/ pasadas)	4.73	
Número de Pasadas Completas		5.00	
Material Tendido para Agregar Agua		5.00	pasadas
Revoltura del Material para Impregnarlo de Agua		5.00	pasadas
Material Tendido		5.00	pasadas
Nivelación del Material para Compactarlo		5.00	pasadas
Total de Pasadas		20.00	

Rendimiento	$(2500\text{m}^3/\text{hr} \times 15\text{m} \times 0.20\text{m} \times 0.75) / 20$	281.25	$\text{m}^3/\text{hr}$
Costo por Equipo	$(360.21 \$/\text{hr} / 281.25\text{m}^3/\text{hr})$	1.80	$\$/\text{m}^3$
Cuadrilla de un Peón	$(9.86 \$/\text{hr} / 6\text{m}^3/\text{hr})$	1.64	$\$/\text{m}^3$
Costo Total por Tendido del Material		3.44	$\$/\text{m}^3$

Resumen del inciso 4000.		3.44	$\$/\text{m}^3$
Material Tendido en Capas de 20cm.			

**5000) Incorporación de Agua**

Costo Horario del Camión Pipa de $8\text{m}^3$		145.33	$\$/\text{hr}$
Ancho del Múltiple de Descarga:		3.00	m
Agua Necesaria para la Compactación:		103.00	$\text{l}/\text{m}^3$
Consumo de Agua por metro lineal			
Recorrido por el Camión:	$(103.00 \text{ l}/\text{m}^3 \times 0.25\text{m}^3/\text{m} \times 3\text{m})$	77.25	$\text{l}/\text{m}$
Recorrido del Camión para Descargar:	$(8000.00 \text{ l} / 77.25 \text{ l}/\text{m})$	103.56	m
Tiempo de Vaciado si el Camión Viaja a $1\text{km}/\text{hr}$ :	$((103.56\text{m} / 1000.00 \text{ m}/\text{hr}) \times 60 \text{ min}/\text{hr})$	6.21	min
Ciclo de Llenado y Vaciado del Camión			
Incluyendo Acarreo de $10\text{km}/\text{hr}$ :	$(8000.00 \text{ l} / 240 \text{ l}/\text{min})$	33.30	min
Tiempo de Llenado (4 l/seg)		6.21	min
Tiempo de Vaciado	$(3\text{min} + 2\text{min} + 2\text{min})$	7.00	min
Recorrido Ida y Vuelta a $10\text{km}$ y Acomodo:	$(33.30\text{min} + 6.21\text{min} + 7.00\text{min})$	46.51	min
Tiempo del Ciclo, Recorrido y Acomodo:		0.78	hr
Costo del Agua por $\text{m}^3$ :	$145.33 \$/\text{hr} \times (0.78\text{hr}/8\text{m}^3)$	14.16	$\$/\text{m}^3$
Costo de la Incorporación del Agua por $\text{m}^3$ :	$(14.16 \$/\text{m}^3 \times 0.100\text{m}^3/\text{m}^3)$	1.42	$\$/\text{m}^3$

Resumen del Inciso 5000		1.42	$\$/\text{m}^3$
Incorporación de Agua			

**6000) Compactación del Material**

Costo Horario del Compactador:		462.94	$\$/\text{hr}$
Ancho del Rodillo:		2.50	m
Velocidad de paso del Rodillo:		2.00	$\text{km}/\text{hr}$
Número de Pasadas para Alcanzar el 95% de la Prueba Proctor:		7.00	
Volumen Compactado por Hora (material suelto):	$(0.80 \times 2.50 \text{ m} \times 2000 \text{ m}/\text{hr} \times 0.20 \text{ m}) / 7$	114.29	$\text{m}^3/\text{hr}$
Costo de Compactación por $\text{m}^3$ de Material Suelto:	$(462.94 \$/\text{hr} / 114.29 \text{ m}^3/\text{hr})$	4.05	$\$/\text{m}^3$

Resumen del inciso 6000		4.05	$\$/\text{m}^3$
Compactación del Material			

**6100) Compactación del Material del Talud**

Costo Horario del Compactador:		462.94	$\$/\text{hr}$
Ancho del Rodillo:		2.50	m
Velocidad de paso del Rodillo:		2.00	$\text{km}/\text{hr}$
Número de Pasadas para Alcanzar el 95% de la Prueba Proctor:		8.00	
Volumen Compactado por Hora (material suelto):	$(0.60 \times 2.50 \text{ m} \times 2000 \text{ m}/\text{hr} \times 0.20 \text{ m}) / 8$	75.00	$\text{m}^3/\text{hr}$
Costo de Compactación por $\text{m}^3$ de Material Suelto:	$(462.94 \$/\text{hr} / 75.00 \text{ m}^3/\text{hr})$	6.17	$\$/\text{m}^3$

Resumen del inciso 6100		6.17	$\$/\text{m}^3$
Compactación del Material del Talud			



**7000) Escarificación entre Capas**

Costo Horario del Cargador		119.14	\$/hr
Ancho del Escarificador con 40 Vástagos		1.82	m
Velocidad de Paso		1.60	km/hr
Número de Pasadas		1.00	
Producción	$(0.80 \times 1600 \text{ m/hr} \times 1.82 \text{ m}) / t$	2912	m <sup>2</sup> /hr
Costo por Escarificado	$(119.14 \text{ $/hr} / 2912.00 \text{ m}^2/\text{hr})$	0.05	\$/m <sup>2</sup>

Resumen del inciso 7000	
Escarificación entre Capas	0.05 \$/m <sup>2</sup>

**8000) Compactación de la Capa Protectora**

Costo Horario del Compactador		460.70	\$/hr
Ancho		2.50	m
Velocidad de Paso		5.00	km/hr
Número de Pasadas		9.00	
Volumen Compactado	$(0.8 \times 2.50 \text{ m} \times 5000 \text{ m/hr} \times 0.20 \text{ m}) / 9$	222.22	m <sup>3</sup> /hr
Costo de Compactación por m <sup>3</sup> de Material			
Suelto:	$(460.70 \text{ $/hr} / 222.22 \text{ m}^3/\text{hr})$	2.07	\$/m <sup>3</sup>

Resumen del inciso 8000	
Compactación para la Capa de ...	2.07 \$/m <sup>3</sup>

**9000) Colocación de la Geomembrana de Polietileno de Alta Densidad (HDPE)**

Costo Horario del Pfaff 8363		60.14	\$/hr
Costo Horario de los Consumibles		0.34	\$/hr
Costo Horario de la Planta de Energía de 5000 watt		13.65	\$/hr
Área del Lienzo de HDPE	7.00m x 106.70m	746.90	m <sup>2</sup>
Área Útil en lo Largo	$7.00\text{m} - 0.075\text{m} - 0.075\text{m}$	6.85	m
Área Útil en lo Ancho	$106.70\text{m} - 0.075\text{m} - 0.075\text{m}$	106.55	m <sup>2</sup>
Área Total Útil	$6.85\text{m} \times 106.55\text{m}$	729.87	m <sup>2</sup>
Número de Lienzos a utilizar (incluye el anclaje)	$11025 \text{ m}^2 / 729.87 \text{ m}^2 \text{ útiles/ lienzo}$	15.00	lienzos
Cantidad Total de Geomembrana	$15 \text{ lienzos} \times 746.90 \text{ m}^2 / \text{lienzo}$	11203.50	m <sup>2</sup>
Rendimiento por Cuadrilla		1250.00	m <sup>2</sup> /jor
Rendimiento por Hora de la Cuadrilla	$1250 \text{ m}^2/\text{jor} / 8\text{hr}/\text{jor}$	156.25	m <sup>2</sup> /hr
Costo por Colocación	$(60.14 + 0.34 + 13.65) \text{ $/hr} / 156.25 \text{ m}^2/\text{hr}$	0.47	\$/m <sup>2</sup>

**Extensión y Limpieza de la Geomembrana**

Cuadrilla		4	peones
Rendimiento		375.69	m <sup>2</sup> /hr
Costo de la Cuadrilla	$(25.00 \text{ $/hr} / 375.69 \text{ m}^2/\text{hr})$	0.07	\$/m <sup>2</sup>

**Materiales**

Cable de uso rudo ST hasta 600 volts	$(50\text{m} \times 16.67 \text{ $/m}) / 10000 \text{ m}^2$	0.08	\$/m <sup>2</sup>
Cinta de Aislar	$(10 \text{ piezas} \times 8.504/\text{pieza}) / 10000 \text{ m}^2$	0.01	\$/m <sup>2</sup>
Estopa	$(20\text{kg} \times 6.50 \text{ $/kg}) / 10000 \text{ m}^2$	0.01	\$/m <sup>2</sup>
Costo de materiales		0.10	\$/m <sup>2</sup>

Resumen del inciso 9000	
Colocación	0.47 \$/m <sup>2</sup>
Extensión y limpieza	0.07 \$/m <sup>2</sup>
Materiales	0.10 \$/m <sup>2</sup>

0.47	\$/m <sup>2</sup>
0.07	\$/m <sup>2</sup>
0.10	\$/m <sup>2</sup>

**10000) Colocación de la Geomembrana de Bentonita**

Costo		56.00	\$/m <sup>2</sup>
Medidas del Lienzo (Espesor 2mm)	(4.57m x 38.10m)	174.17	m <sup>2</sup>
Traslape Mínimo		0.25	m
Área Útil	(4.07m x 37.60m)	153.03	m <sup>2</sup>
Número de Lienzos Necesarios	(10000.00m <sup>2</sup> / 153.03m <sup>2</sup> /lienzo)	66.00	lienzos
Área Total por Lienzos	(66.00 lienzos / 174.17 m <sup>2</sup> /lienzos)	11495.22	m <sup>2</sup>

Colocación		6.25	\$/hr
Mano de Obra		350.00	m <sup>2</sup> /hr
Rendimiento		0.02	\$/m <sup>2</sup>
Costo por Mano de Obra	(6.25\$/hr / 350.00m <sup>2</sup> /hr)		

Materiales		4.00	pza
Brocha de 10cm		25.00	\$/pza
Costo		0.01	\$/m <sup>2</sup>
Costo por m <sup>2</sup>	(4pzas x 25 \$/pza / 10000m <sup>2</sup> )	1765.25	\$/tambo
Impermeabilizante Adherente		0.02	\$/m <sup>2</sup>
Costo por m <sup>2</sup>	(1765.25\$/tambo x 1 tambo/10000m <sup>2</sup> )		

Resumen del inciso 10000		0.04	\$/m <sup>2</sup>
Colocación de la Geomembrana de ....			

**11000) Colocación de la Geomalla**

Geomalla (Red de Drenaje)		32.00	\$/m <sup>2</sup>
Costo		78.00	m <sup>2</sup>
Medidas del Lienzo	(1.30m x 60.00m)	129.00	lienzos
Número de Lienzos Necesarios	(10000m <sup>2</sup> / 78m <sup>2</sup> /lienzo)	10062.00	m <sup>2</sup>
Área Total por Lienzos	(129.00 lienzos x 78m <sup>2</sup> /lienzo)		

Colocación		6.25	\$/hr
Mano de Obra		125.00	m <sup>2</sup> /hr
Rendimiento		0.05	\$/m <sup>2</sup>
Costo por Mano de Obra	(6.25\$/hr x 125.00m <sup>2</sup> /hr)	0.00	cm
Traslape			

Materiales		2.00	pzas/m <sup>2</sup>
Cintillos de Plástico para el Enlace		0.25	m
Distancia de Colocación		0.20	\$/pza
Costo por Cintillo		0.40	\$/m <sup>2</sup>
Costo Total por Cintillos	(2.00 pzas/m <sup>2</sup> x 0.20 \$/pza)		

Resumen del inciso 11000		0.45	\$/m <sup>2</sup>
Colocación de la Geomalla			

**12000 Colocación de la Geored**

<i>Geored Biaxial (BX 122)</i>			
Costo		32.00	\$/m <sup>2</sup>
Medidas del Lienzo	(4.00m x 50m)	200.00	m <sup>2</sup>
Traslape		0.25	m
Área Útil	(3.50m x 49.50m)	173.25	m <sup>2</sup>
Número de Lienzos Necesarios	(10000m <sup>2</sup> / 173.25m <sup>2</sup> /lienzo)	58.00	lienzos
Área Total por Lienzo	(58.00 lienzos x 200m <sup>2</sup> /lienzo)	11600.00	m <sup>2</sup>

<i>Colocación</i>			
Mano de Obra		6.25	\$/hr
Rendimiento		100.00	m <sup>2</sup> /hr
Costo por Mano de Obra	(6.25 \$/hr / 100.00 m <sup>2</sup> /hr)	0.06	\$/m <sup>2</sup>
Traslape		0.25	m

<i>Materiales</i>			
Cintillos de Plástico para el Enlace		2.00	pzas/m <sup>2</sup>
Distancia de Colocación (colocar en tresbolillo)		0.50	m
Costo por Cintillo		0.20	\$/pza
Costo Total por Cintillos		0.40	\$/m <sup>2</sup>

<b>Resumen del inciso 12000</b>			
Colocación de la Geored		0.46	\$/m <sup>2</sup>

**COSTOS  
HORARIOS**

<b>MAQUINA</b> <b>MODELO</b>	Retroexcavadora CAT 235	<b>Fecha:</b> octubre de 1997			
<b>DATOS GENERALES</b>					
Valor de Adquisición Valor de Llantas Valor Inicial (Va) Valor de Rescate (Vr) Tasa de Interés (i) Prima de Seguros (s) Vida Económica (Ve) Horas por Año (Ha)	2926150.93 0.00 2926150.93 20% 9% 2% 12000.00 2000.00	Potencia Factor de Operación Potencia de Operación (Po) Coeficiente de Almacenaje Factor de Mantenimiento(Q)			
		195.00 HP 0.80 156.00 HP 0.00 0.80			
<b>1. CARGOS FIJOS</b>					
CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	%	COSTO	%
1.1. Depreciación	$D = (Va - Vr) / Ve$	195.0767	44%	195.08	
1.2. Inversión	$I = (Va + Vr) \times i / 2 Ha$	76.3725	17%	76.37	
1.3. Seguros	$S = (Va + Vr) \times s / 2 Ha$	15.8012	4%	15.80	
1.4. Mantenimiento	$T = Q \times D$	156.0614	35%	156.06	
SUMA		443.3119	100%	443.31	80%
<b>2. CONSUMOS</b>					
CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	%	COSTO	%
2.1. Combustibles	$E = C \times Po \times Pc$				
Diesel	$E = 0.20 \times Po \times Pc$	73.3200	87%	73.32	
Gasolina	$E = 0.24 \times Po \times Pc$	0.0000			
2.2. Otras Fuentes de Energía	-	0.0000			
2.3. Lubricantes de Motor	$Al = (c + al) \times Pl$	11.0037	13%	11.00	
Potencia > 100 HP	$c = 0.0035 \times HP Po$	0.5460			
	$al = cc / ca$	0.2300			
Capacidad del Carter	cc	23.0000			
Cambios de Aceite	ca	100.0000			
2.4. Llantas	$N = Vn / Hv$	0.0000	0%	0.00	
Valor de las Llantas	Vn	0.0000			
Vida Económica	Hv	0.0000			
SUMA		84.3237	100%	84.32	15%
<b>3. OPERACION</b>					
CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	%	COSTO	%
3.1. Operación	$Co = So / fH$	23.4721	100%	23.47	
Salario Integrado por Turno	So	159.6100			
Horas por Turno	H	8.0000			
Factor de Rendimiento	f	0.8500			
SUMA			100%	23.47	4%
<b>COSTO DIRECTO HORA MAQUINA</b>				551.11	100%

MÁQUINA  
MODELOCamión Pipa 8m<sup>3</sup>  
FAMSA

Fecha: octubre de 1997

## DATOS GENERALES

Valor de Adquisición		313204.56	Potencia	140.00	HP
Valor de Llantas		7988.63	Factor de Operación	0.70	
Valor Inicial (Va)		305215.93	Potencia de Operación (Po)	98.00	HP
Valor de Rescate (Vr)	20%	61043.19	Coefficiente de Almacenaje	0.00	
Tasa de Interés (i)	9%	26553.79	Factor de Mantenimiento(Q)	0.75	
Prima de Seguros (s)	2%	5493.89			
Vida Económica (Ve)		12000.00			
Horas por Año (Ha)		2000.00			

## 1. CARGOS FIJOS

CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCIÓN	%	COSTO	%
1.1. Depreciación	$D = Va - Vr / Ve$	20.3477	45%	20.35	
1.2. Inversión	$I = (Va + Vr) \times i / 2 Ha$	7.9661	18%	7.97	
1.3. Seguros	$S = (Va + Vr) \times s / 2 Ha$	1.6482	4%	1.65	
1.4. Mantenimiento	$T = Q \times D$	15.2608	34%	15.26	
SUMA		45.2228	100%	45.22	31%

## 2. CONSUMOS

CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCIÓN	%	COSTO	%
2.1. Combustibles	$E = C \times Po \times Pc$				
Diesel	$E = 0.20 \times Po \times Pc$	0.0000	0%	0.00	
Gasolina	$E = 0.24 \times Po \times Pc$	74.0880	89%	74.09	
2.2. Otras Fuentes de Energía		0.0000			
2.3. Lubricantes de Motor	$Al = (c + al) \times Pl$	6.5653	8%	6.57	
Potencia > 100 HP	$c = 0.0035 \times HP Po$	0.3430			
Capacidad del Carter	$al = cc / ca$	0.1200			
Cambios de Aceite	$cc$	12.0000			
Llantas	$ca$	100.0000			
Vida Económica	$N = Vn / Hv$	2.6629	3%	2.66	
Valor de las Llantas	$Vn$	7988.6300			
Vida Económica	$Hv$	3000.0000			
SUMA			100%	83.32	57%

## 3. OPERACION

CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCIÓN	%	COSTO	%
3.1. Operación	$Co = So / IH$	16.8056	100%	16.81	
Salario Integrado por Turno	$So$	121.0000			
Horas por Turno	$H$	8.0000			
Factor de Rendimiento	$f$	0.9000			
SUMA			100%	16.81	12%

COSTO DIRECTO HORA MAQUINA

145.34 | 100%

MAQUINA Planta de Energía Eléctrica  
 MODELO COLEMAN de 5000 watt, 8HP

Fecha: octubre de 1997

**DATOS GENERALES**

Valor de Adquisición		2203.40		
Valor de Llantas		0.00	Potencia	8.00 HP
Valor Inicial (Va)		2203.40	Factor de Operación	1.00
Valor de Rescate (Vr)	25%	550.85	Potencia de Operación (Po)	8.00 HP
Tasa de Interés (i)	9%	191.70	Coefficiente de Almacenaje	0.00
Prima de Seguros (s)	2%	39.66	Factor de Mantenimiento(Q)	0.00
Vida Económica (Ve)		8000.00		
Horas por Año (Ha)		2000.00		

**1. CARGOS FIJOS**

CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	%	COSTO	%
1.1. Depreciación	$D = Va - Vr / Ve$	0.2066	74%	0.21	
1.2. Inversión	$I = (Va + Vr) \times i / 2 Ha$	0.0599	21%	0.06	
1.3. Seguros	$S = (Va + Vr) \times s / 2 Ha$	0.0124	4%	0.01	
1.4. Mantenimiento	$T = Q \times D$	0.0000	0%	0.00	
<b>SUMA</b>		<b>0.2789</b>	<b>100%</b>	<b>0.28</b>	<b>2%</b>

**2. CONSUMOS**

CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	%	COSTO	%
2.1. Combustibles	$E = C \times Po \times Pc$				
Diesel	$E = 0.20 \times Po \times Pc$	0.0000	0%	0.00	
Gasolina	$E = 0.24 \times Po \times Pc$	5.0400	100%	5.04	
2.2. Otras Fuentes de Energía	-	0.0000			
2.3. Lubricantes de Motor	$Al = (c + al) \times Pl$	0.0000	0%	0.00	
Potencia > 100 HP	$c = 0.0030 \times HP Po$	0.0280			
	$al = cc / ca$	0.0000			
Capacidad del Carter	cc	0.0000			
Cambios de Aceite	ca	0.0000			
2.4. Llantas	$N = Vn / Hv$	0.0000	0%	0.00	
Valor de las Llantas	Vn	0.0000			
Vida Económica	Hv	0.0000			
<b>SUMA</b>			<b>100%</b>	<b>5.04</b>	<b>37%</b>

**3. OPERACION**

CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	%	COSTO	%
3.1. Operación	$Co = So / fH$	8.3333	100%	8.33	
Salario Integrado por Turno	So	60.0000			
Horas por Turno	H	8.0000			
Factor de Rendimiento	f	0.9000			
<b>SUMA</b>			<b>100%</b>	<b>8.33</b>	<b>61%</b>

**COSTO DIRECTO HORA MAQUINA**

**13.65 100%**

MAQUINA Motoconformadora  
 MODELO CAT 140B

Fecha: octubre de 1997

DATOS GENERALES

Valor de Adquisición		1274227.98	Potencia	150.00	HP
Valor de Llantas		20770.46	Factor de Operación	0.80	
Valor Inicial (Va)		1253457.52	Potencia de Operación (Po)	120.00	HP
Valor de Rescate (Vr)	25%	313364.38	Coficiente de Almacenaje	0.00	
Tasa de Interés (i)	9%	109050.80	Factor de Mantenimiento(Q)	0.80	
Prima de Seguros (s)	2%	22562.24			
Vida Económica (Ve)		8000.00			
Horas por Año (Ha)		1600.00			

1. CARGOS FIJOS

CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	%	COSTO	%
1.1. Depreciación	$D = Va - Vr / Ve$	117.5116	45%	117.51	
1.2. Inversión	$I = (Va + Vr) \times i / 2 Ha$	42.5980	16%	42.60	
1.3. Seguros	$S = (Va + Vr) \times s / 2 Ha$	8.8134	3%	8.81	
1.4. Mantenimiento	$T = Q \times D$	94.0093	36%	94.01	
SUMA		262.9323	100%	262.93	73%

2. CONSUMOS

CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	%	COSTO	%
2.1. Combustibles	$E = C \times Po \times Pc$				
Disel	$E = 0.20 \times Po \times Pc$	56.4000	76%	56.40	
Gasolina	$E = 0.24 \times Po \times Pc$	0.0000			
2.2. Otras Fuentes de Energía		0.0000			
2.3. Lubricantes de Motor	$Al = (c + al) \times Pl$	9.9827	14%	9.98	
Potencia > 100 HP	$c = 0.0035 \times HP Po$	0.4200			
Capacidad del Carter	$al = cc / ca$	0.2840			
Cambios de Aceite	cc	28.4000			
Llantas	ca	100.0000			
Valor de las Llantas	$N = Vn / Hv$	7.4180	10%	7.42	
Vida Económica	Vn	20770.4600			
	Hv	2800.0000			
SUMA			100%	73.80	20%

3. OPERACION

CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	COSTO	%
3.1. Operación	$Co = So / fH$	23.4721	100%	23.47
Salario Integrado por Turno	So	159.6100		
Horas por Turno	H	8.0000		
Factor de Rendimiento	f	0.8500		
SUMA			100%	23.47 7%

COSTO DIRECTO HORA MAQUINA 360.21 100%



<b>MÁQUINA</b> MODELO	Camión de Volteo de 7m <sup>3</sup> FAMSA	Fecha: octubre de 1997																																																																																								
<b>DATOS GENERALES</b>																																																																																										
Valor de Adquisición Valor de Llantas Valor Inicial (Va) Valor de Rescate (Vr)      20% Tasa de Interés (i)      9% Prima de Seguros (s)      2% Vida Económica (Ve) Horas por Año (Ha)	348866.59 7988.63 340877.96 68175.59 29656.38 6135.80 12000.00 2000.00	Potencia      140.00 HP Factor de Operación      0.70 Potencia de Operación (Po)      98.00 HP Coeficiente de Almacenaje      0.00 Factor de Mantenimiento(Q)      0.75																																																																																								
<b>1. CARGOS FIJOS</b>																																																																																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">CONCEPTO</th> <th style="width: 30%;">FORMULA</th> <th style="width: 10%;">SUSTITUCION</th> <th style="width: 10%;">%</th> <th style="width: 10%;">COSTO</th> <th style="width: 10%;">%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.1. Depreciación</td> <td><math>D = Va - Vr / Ve</math></td> <td>22.7252</td> <td>45%</td> <td>22.73</td> <td></td> </tr> <tr> <td>1.2. Inversión</td> <td><math>I = (Va + Vr) \times i / 2 Ha</math></td> <td>8.8969</td> <td>18%</td> <td>8.90</td> <td></td> </tr> <tr> <td>1.3. Seguros</td> <td><math>S = (Va + Vr) \times s / 2 Ha</math></td> <td>1.8407</td> <td>4%</td> <td>1.84</td> <td></td> </tr> <tr> <td>1.4. Mantenimiento</td> <td><math>T = Q \times D</math></td> <td>17.0439</td> <td>34%</td> <td>17.04</td> <td></td> </tr> <tr> <td><b>SUMA</b></td> <td></td> <td>50.5068</td> <td>100%</td> <td>50.51</td> <td>66%</td> </tr> </tbody> </table>	CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	%	COSTO	%	1.1. Depreciación	$D = Va - Vr / Ve$	22.7252	45%	22.73		1.2. Inversión	$I = (Va + Vr) \times i / 2 Ha$	8.8969	18%	8.90		1.3. Seguros	$S = (Va + Vr) \times s / 2 Ha$	1.8407	4%	1.84		1.4. Mantenimiento	$T = Q \times D$	17.0439	34%	17.04		<b>SUMA</b>		50.5068	100%	50.51	66%																																																						
CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	%	COSTO	%																																																																																					
1.1. Depreciación	$D = Va - Vr / Ve$	22.7252	45%	22.73																																																																																						
1.2. Inversión	$I = (Va + Vr) \times i / 2 Ha$	8.8969	18%	8.90																																																																																						
1.3. Seguros	$S = (Va + Vr) \times s / 2 Ha$	1.8407	4%	1.84																																																																																						
1.4. Mantenimiento	$T = Q \times D$	17.0439	34%	17.04																																																																																						
<b>SUMA</b>		50.5068	100%	50.51	66%																																																																																					
<b>2. CONSUMOS</b>																																																																																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">CONCEPTO</th> <th style="width: 30%;">FORMULA</th> <th style="width: 10%;">SUSTITUCION</th> <th style="width: 10%;">%</th> <th style="width: 10%;">COSTO</th> <th style="width: 10%;">%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2.1. Combustibles</td> <td><math>E = C \times Po \times Pc</math></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Diesel</td> <td><math>E = 0.20 \times Po \times Pc</math></td> <td>0.0000</td> <td>0%</td> <td>0.00</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Gasolina</td> <td><math>E = 0.24 \times Po \times Pc</math></td> <td>61.7400</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2.2. Otras Fuentes de Energía</td> <td>-</td> <td>0.0000</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2.3. Lubricantes de Motor</td> <td><math>Al = (c + al) \times Pl</math></td> <td>6.5653</td> <td>100%</td> <td>6.57</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Potencia &gt; 100 HP</td> <td><math>c = 0.0035 \times HP Po</math></td> <td>0.3430</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;"></td> <td><math>al = cc / ca</math></td> <td>0.1200</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Capacidad del Carter</td> <td>cc</td> <td>12.0000</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Cambios de Aceite</td> <td>ca</td> <td>100.0000</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2.4. Llantas</td> <td><math>N = Vn / Hv</math></td> <td>2.6629</td> <td>0%</td> <td>0.00</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Valor de las Llantas</td> <td>Vn</td> <td>7988.6300</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Vida Económica</td> <td>Hv</td> <td>3000.0000</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td><b>SUMA</b></td> <td></td> <td></td> <td>100%</td> <td>6.57</td> <td>9%</td> </tr> </tbody> </table>	CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	%	COSTO	%	2.1. Combustibles	$E = C \times Po \times Pc$					Diesel	$E = 0.20 \times Po \times Pc$	0.0000	0%	0.00		Gasolina	$E = 0.24 \times Po \times Pc$	61.7400				2.2. Otras Fuentes de Energía	-	0.0000				2.3. Lubricantes de Motor	$Al = (c + al) \times Pl$	6.5653	100%	6.57		Potencia > 100 HP	$c = 0.0035 \times HP Po$	0.3430					$al = cc / ca$	0.1200				Capacidad del Carter	cc	12.0000				Cambios de Aceite	ca	100.0000				2.4. Llantas	$N = Vn / Hv$	2.6629	0%	0.00		Valor de las Llantas	Vn	7988.6300				Vida Económica	Hv	3000.0000				<b>SUMA</b>			100%	6.57	9%						
CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	%	COSTO	%																																																																																					
2.1. Combustibles	$E = C \times Po \times Pc$																																																																																									
Diesel	$E = 0.20 \times Po \times Pc$	0.0000	0%	0.00																																																																																						
Gasolina	$E = 0.24 \times Po \times Pc$	61.7400																																																																																								
2.2. Otras Fuentes de Energía	-	0.0000																																																																																								
2.3. Lubricantes de Motor	$Al = (c + al) \times Pl$	6.5653	100%	6.57																																																																																						
Potencia > 100 HP	$c = 0.0035 \times HP Po$	0.3430																																																																																								
	$al = cc / ca$	0.1200																																																																																								
Capacidad del Carter	cc	12.0000																																																																																								
Cambios de Aceite	ca	100.0000																																																																																								
2.4. Llantas	$N = Vn / Hv$	2.6629	0%	0.00																																																																																						
Valor de las Llantas	Vn	7988.6300																																																																																								
Vida Económica	Hv	3000.0000																																																																																								
<b>SUMA</b>			100%	6.57	9%																																																																																					
<b>3. OPERACION</b>																																																																																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">CONCEPTO</th> <th style="width: 30%;">FORMULA</th> <th style="width: 10%;">SUSTITUCION</th> <th style="width: 10%;">COSTO</th> <th style="width: 10%;">%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3.1. Operación</td> <td><math>Co = So / fH</math></td> <td>18.9063</td> <td>100%</td> <td>18.91</td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Salario Integrado por Turno</td> <td>So</td> <td>121.0000</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Horas por Turno</td> <td>H</td> <td>8.0000</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="padding-left: 20px;">Factor de Rendimiento</td> <td>f</td> <td>0.8000</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td><b>SUMA</b></td> <td></td> <td></td> <td>100%</td> <td>18.91</td> </tr> </tbody> </table>	CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	COSTO	%	3.1. Operación	$Co = So / fH$	18.9063	100%	18.91	Salario Integrado por Turno	So	121.0000			Horas por Turno	H	8.0000			Factor de Rendimiento	f	0.8000			<b>SUMA</b>			100%	18.91																																																												
CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	COSTO	%																																																																																						
3.1. Operación	$Co = So / fH$	18.9063	100%	18.91																																																																																						
Salario Integrado por Turno	So	121.0000																																																																																								
Horas por Turno	H	8.0000																																																																																								
Factor de Rendimiento	f	0.8000																																																																																								
<b>SUMA</b>			100%	18.91																																																																																						
<b>COSTO DIRECTO HORA MAQUINA</b>			75.98	100%																																																																																						

MAQUINA Compactador "Pata de Cabra"  
 MODELO CAT 815 (20 ton.)

Fecha: octubre de 1997

DATOS GENERALES

Valor de Adquisición		1982558.11	Potencia	210.00	HP
Valor de Llantas		0.00	Factor de Operación	0.80	
Valor Inicial (Va)		1982558.11	Potencia de Operación (Po)	168.00	HP
Valor de Rescate (Vr)	20%	396511.62	Coefficiente de Almacenaje	0.00	
Tasa de Interés (i)	9%	172482.56	Factor de Mantenimiento(Q)	0.80	
Prima de Seguros (s)	2%	35686.05			
Vida Económica (Ve)		10000.00			
Horas por Año (Ha)		2000.00			

1. CARGOS FIJOS

CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	%	COSTO	%
1.1. Depreciación	$D = Va - Vr / Ve$	158.6046	46%	158.60	
1.2. Inversión	$I = (Va + Vr) \times i / 2 Ha$	51.7448	15%	51.74	
1.3. Seguros	$S = (Va + Vr) \times s / 2 Ha$	10.7058	3%	10.71	
1.4. Mantenimiento	$T = Q \times D$	126.8837	36%	126.88	
SUMA		347.9389	100%	347.94	75%

2. CONSUMOS

CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	%	COSTO	%
2.1. Combustibles	$E = C \times Po \times Pc$				
Diesel	$E = 0.20 \times Po \times Pc$	78.9600	85%	78.96	
Gasolina	$E = 0.24 \times Po \times Pc$	0.0000		0.0000	
2.2. Otras Fuentes de Energía					
2.3. Lubricantes de Motor	$Al = (c + al) \times Pl$	13.8680	15%	13.87	
Potencia > 100 HP	$c = 0.0035 \times HP Po$	0.5880			
Capacidad del Carter	$al = cc / ca$	0.3900			
Cambios de Aceite	$cc$	39.0000			
Cambios de Aceite	$ca$	100.0000			
2.4. Llantas	$N = Vn / Hv$	0.0000	0%	0.00	
Valor de las Llantas	$Vn$	0.0000			
Vida Económica	$Hv$	0.0000			
SUMA			100%	92.83	20%

3. OPERACION

CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	COSTO	%
3.1. Operación	$Co = So / fh$	22.1681	100%	22.17
Salario Integrado por Turno	$So$	159.6100		
Horas por Turno	$H$	8.0000		
Factor de Rendimiento	$f$	0.9000		
SUMA			100%	22.17

COSTO DIRECTO HORA MAQUINA

462.94 100%

<b>EQUIPO</b> MODELO	PFAFF de Cuña Simple 8363	<b>Fecha:</b> octubre de 1997			
<b>DATOS GENERALES</b>					
Valor de Adquisición	76971.90				
Valor de Llantas	0.00	Potencia 0.00 HP			
Valor Inicial (Va)	76971.90	Factor de Operación 1.00			
Valor de Rescate (Vr)	20% 15394.38	Potencia de Operación (Po) 0.00 HP			
Tasa de Interés (i)	9% 6696.56	Coefficiente de Almacenaje 0.00			
Prima de Seguros (s)	2% 1385.49	Factor de Mantenimiento(Q) 0.80			
Vida Económica (Ve)	8000.00				
Horas por Año (Ha)	2000.00				
<b>1. CARGOS FIJOS</b>					
<b>CONCEPTO</b>	<b>FORMULA</b>	<b>SUSTITUCION</b>	<b>%</b>	<b>COSTO</b>	<b>%</b>
1.1. Depreciación	$D = Va - Vr / Ve$	7.6972	47%	7.70	
1.2. Inversión	$I = (Va + Vr) \times i / 2 Ha$	2.0090	12%	2.01	
1.3. Seguros	$S = (Va + Vr) \times s / 2 Ha$	0.4156	3%	0.42	
1.4. Mantenimiento	$T = Q \times D$	6.1578	38%	6.16	
<b>SUMA</b>		16.2796	100%	16.28	27%
<b>2. CONSUMOS</b>					
<b>CONCEPTO</b>	<b>FORMULA</b>	<b>SUSTITUCION</b>	<b>%</b>	<b>COSTO</b>	<b>%</b>
2.1. Combustibles	$E = C \times Po \times Pc$				
Disel	$E = 0.20 \times Po \times Pc$	0.0000	0%	0.00	
Gasolina	$E = 0.24 \times Po \times Pc$	0.0000			
2.2. Otras Fuentes de Energía	Energía Eléctrica	0.0000		0.00	
2.3. Lubricantes de Motor	$Al = (c + al) \times Pl$	0.0000	0%	0.00	
Potencia > 100 HP	$c = 0.0035 \times HP Po$	0.0000			
	$al = cc / ca$	0.0000			
Capacidad del Carter	cc	0.0000			
Cambios de Aceite	ca	0.0000			
2.4. Llantas	$N = Vn / Hv$	0.0000	0%	0.00	
Valor de las Llantas	Vn	0.0000			
Vida Económica	Hv	0.0000			
<b>SUMA</b>			0%	0.00	0%
<b>3. OPERACION</b>					
<b>CONCEPTO</b>	<b>FORMULA</b>	<b>SUSTITUCION</b>	<b>%</b>	<b>COSTO</b>	<b>%</b>
3.1. Operación	$Co = So / fH$	43.8592	100%	43.86	
Salario Integrado por Turno	So	333.3300			
Horas por Turno	H	8.0000			
Factor de Rendimiento	f	0.9500			
<b>SUMA</b>			100%	43.86	73%
<b>COSTO DIRECTO HORA MAQUINA</b>				60.14	100%

CONSUMIBLE MODELO	Aditamentos para Equipo PFAFF 8363	Fecha: octubre de 1997
<b>DATOS GENERALES</b>		
Valor de Adquisición	2415.61	
Valor de Llantas	0.00	Potencia
Valor Inicial (Va)	2415.61	Factor de Operación
Valor de Rescate (Vr)	10% 241.56	Potencia de Operación (Po)
Tasa de Interés (i)	9% 210.16	Coefficiente de Almacenaje
Prima de Seguros (s)	2% 43.48	Factor de Mantenimiento(Q)
Vida Económica (Ve)	8000.00	
Horas por Año (Ha)	2000.00	
<b>1. CARGOS FIJOS</b>		
CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION
1.1. Depreciación	$D = Va - Vr / Ve$	0.2718
1.2. Inversión	$I = (Va + Vr) \times i / 2 Ha$	0.0578
1.3. Seguros	$S = (Va + Vr) \times s / 2 Ha$	0.0120
1.4. Mantenimiento	$T = Q \times D$	0.0000
SUMA		0.3415
		80%
		17%
		4%
		0%
		0.27
		0.06
		0.01
		0.00
		0.34
		100%
		100%
<b>2. CONSUMOS</b>		
CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION
2.1. Combustibles	$E = C \times Po \times Pc$	0.0000
Diesel	$E = 0.20 \times Po \times Pc$	0.0000
Gasolina	$E = 0.24 \times Po \times Pc$	0.0000
2.2. Otras Fuentes de Energía	Energía Eléctrica	0.0000
2.3. Lubricantes de Motor	$Al = (c + al) \times Pl$	0.0000
Potencia > 100 HP	$c = 0.0035 \times HP Po$	0.0000
	$al = cc / ca$	0.0000
Capacidad del Carter	cc	0.0000
Cambios de Aceite	ca	0.0000
2.4. Llantas	$N = Vn / Hv$	0.0000
Valor de las Llantas	Vn	0.0000
Vida Económica	Hv	0.0000
SUMA		0%
		0.00
		0%
<b>3. OPERACION</b>		
CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION
3.1. Operación	$Co = So / fH$	0.0000
Salario Integrado por Turno	So	0.0000
Horas por Turno	H	0.0000
Factor de Rendimiento	f	0.0000
SUMA		0%
		0.00
		0%
COSTO DIRECTO HORA MAQUINA		0.34
		100%

EQUIPO MODELO	Nivel para Medición K-E DUMPY	Fecha: octubre de 1997
------------------	----------------------------------	------------------------

DATOS GENERALES					
Valor de Adquisición		3576.31			
Valor de Llantas		0.00	Potencia	0.00	HP
Valor Inicial (Va)		3576.31	Factor de Operación	0.00	
Valor de Rescate (Vr)	25%	894.08	Potencia de Operación (Po)	0.00	HP
Tasa de Interés (i)	9%	311.14	Coficiente de Almacenaje	0.00	
Prima de Seguros (s)	2%	64.37	Factor de Mantenimiento(Q)	0.80	
Vida Económica (Ve)		5000.00			
Horas por Año (Ha)		1000.00			

1. CARGOS FIJOS						
CONCEPTO		FORMULA	SUSTITUCION	%	COSTO	%
1.1. Depreciación		$D = Va - Vr / Ve$	0.5364	45%	0.54	
1.2. Inversión		$I = (Va + Vr) \times i / 2 Ha$	0.1945	16%	0.19	
1.3. Seguros		$S = (Va + Vr) \times s / 2 Ha$	0.0402	3%	0.04	
1.4. Mantenimiento		$T = Q \times D$	0.4292	36%	0.43	
SUMA			1.2003	100%	1.20	13%

2. CONSUMOS						
CONCEPTO		FORMULA	SUSTITUCION	%	COSTO	%
2.1. Combustibles		$E = C \times Po \times Pc$				
Diesel		$E = 0.20 \times Po \times Pc$	0.0000	0%	0.00	
Gasolina		$E = 0.24 \times Po \times Pc$	0.0000			
2.2. Otras Fuentes de Energía		Energía Eléctrica	0.0000		0.00	
2.3. Lubricantes de Motor		$Al = (c + al) \times Pl$	0.0000	0%	0.00	
Potencia > 100 HP		$c = 0.0035 \times HP Po$	0.0000			
		$al = cc / ca$	0.0000			
Capacidad del Carter		cc	0.0000			
Cambios de Aceite		ca	0.0000			
2.4. Llantas		$N = Vn / Hv$	0.0000	0%	0.00	
Valor de las Llantas		Vn	0.0000			
Vida Económica		Hv	0.0000			
SUMA				0%	0.00	0%

3. OPERACION						
CONCEPTO		FORMULA	SUSTITUCION		COSTO	%
3.1. Operación		$Co = So / fH$	8.3333	100%	8.33	
Salario Integrado por Turno		So	60.0000			
Horas por Turno		H	8.0000			
Factor de Rendimiento		f	0.9000			
SUMA				100%	8.33	87%

COSTO DIRECTO HORA MAQUINA		9.53	100%
----------------------------	--	------	------

EQUIPO Tránsito para Medición  
 MODELO CHS

Fecha: octubre de 1997

**DATOS GENERALES**

Valor de Adquisición		5000.00	Potencia	0.00	HP
Valor de Llantas		0.00	Factor de Operación	0.00	
Valor Inicial (Va)		5000.00	Potencia de Operación (Po)	0.00	HP
Valor de Rescate (Vr)	25%	1250.00	Coficiente de Almacenaje	0.00	
Tasa de Interés (i)	9%	435.00	Factor de Mantenimiento(Q)	0.80	
Prima de Seguros (s)	2%	90.00			
Vida Económica (Ve)		5000.00			
Horas por Año (Ha)		1000.00			

**1. CARGOS FIJOS**

CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	%	COSTO	%
1.1. Depreciación	$D = Va - Vr / Ve$	0.7500	45%	0.75	
1.2. Inversión	$I = (Va + Vr) \times i / 2 Ha$	0.2719	16%	0.27	
1.3. Seguros	$S = (Va + Vr) \times s / 2 Ha$	0.0563	3%	0.06	
1.4. Mantenimiento	$T = Q \times D$	0.6000	36%	0.60	
SUMA		1.6781	100%	1.68	17%

**2. CONSUMOS**

CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	%	COSTO	%
2.1. Combustibles	$E = C \times Po \times Pc$				
Diesel	$E = 0.20 \times Po \times Pc$	0.0000	0%	0.00	
Gasolina	$E = 0.24 \times Po \times Pc$	0.0000		0.00	
2.2. Otras Fuentes de Energía	Energía Eléctrica	0.0000	0%	0.00	
2.3. Lubricantes de Motor	$Al = (c + al) \times Pl$				
Potencia > 100 HP	$c = 0.0035 \times HP Po$	0.0000			
	$al = cc / ca$	0.0000			
Capacidad del Carter	cc	0.0000			
Cambios de Aceite	ca	0.0000			
2.4. Llantas	$N = Vn / Hv$	0.0000	0%	0.00	
Valor de las Llantas	Vn	0.0000			
Vida Económica de las Llantas	Hv				
SUMA			0%	0.00	0%

**3. OPERACION**

CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	COSTO	%
3.1. Operación	$Co = So / fH$	8.3333	100%	8.33
Salario Integrado por Turno	So	60.0000		
Horas por Turno	H	8.0000		
Factor de Rendimiento	f	0.9000		
SUMA			100%	8.33 83%
<b>COSTO DIRECTO HORA MAQUINA</b>				10.01 100%

MAQUINA MODELO	Tractor sobre Orugas CAT D7H	Fecha: octubre de 1997			
<b>DATOS GENERALES</b>					
Valor de Adquisición Valor de Llantas Valor Inicial (Va) Valor de Rescate (Vr) Tasa de Interés (i) Prima de Seguros (s) Vida Económica (Ve) Horas por Año (Ha)	1142500.20 0.00 1142500.20 20% 9% 2% 228500.04 99397.52 20565.00 12000.00 2000.00	Potencia Factor de Operación Potencia de Operación (Po) Coeficiente de Almacenaje Factor de Mantenimiento(Q)	215.00 HP 0.90 193.50 HP 0.00 0.80		
<b>1. CARGOS FIJOS</b>					
CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	%	COSTO	%
1.1. Depreciación	$D = Va - Vr / Ve$	76.1667	44%	76.17	
1.2. Inversión	$I = (Va + Vr) \times i / 2 Ha$	29.8193	17%	29.82	
1.3. Seguros	$S = (Va + Vr) \times s / 2 Ha$	6.1695	4%	6.17	
1.4. Mantenimiento	$T = Q \times D$	60.9333	35%	60.93	
SUMA		173.0888	100%	173.09	59%
<b>2. CONSUMOS</b>					
CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION	%	COSTO	%
2.1. Combustibles	$E = C \times Po \times Pc$				
Diesel	$E = 0.20 \times Po \times Pc$	90.9450	88%	90.95	
Gasolina	$E = 0.24 \times Po \times Pc$	0.0000		0.00	
2.2. Otras Fuentes de Energía	-	0.0000			
2.3. Lubricantes de Motor	$Al = (c + al) \times Pl$	11.8722	12%	11.87	
Potencia > 100 HP	$c = 0.0035 \times HP Po$	0.6773			
	$al = cc / ca$	0.1600			
Capacidad del Carter	cc	16.0000			
Cambios de Aceite	ca	100.0000			
2.4. Llantas	$N = Vn / Hv$	0.0000	0%	0.00	
Valor de las Llantas	Vn	0.0000			
Vida Económica	Hv	0.0000			
SUMA			100%	102.82	35%
<b>3. OPERACION</b>					
CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCION		COSTO	%
3.1. Operación	$Co = So / fH$	19.8529	100%	19.85	
Salario Integrado por Turno	So	135.0000			
Horas por Turno	H	8.0000			
Factor de Rendimiento	f	0.8500			
SUMA			100%	19.85	7%
<b>COSTO DIRECTO HORA MAQUINA</b>				295.76	100%

MAQUINA Compactador Liso 20 ton.  
 MODELO CAT 815B

Fecha: octubre de 1997

DATOS GENERALES

Valor de Adquisición		1892558.11	Potencia	310.00	HP
Valor de Llantas		0.00	Factor de Operación	0.90	
Valor Inicial (Va)		1892558.11	Potencia de Operación (Po)	279.00	HP
Valor de Rescate (Vr)	20%	378511.62	Coficiente de Almacenaje	0.00	
Tasa de Interés (i)	9%	164652.56	Factor de Mantenimiento(Q)	0.80	
Prima de Seguros (s)	2%	34066.05			
Vida Económica (Ve)		12000.00			
Horas por Año (Ha)		2000.00			

1. CARGOS FIJOS

CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCIÓN	%	COSTO	%
1.1. Depreciación	$D = Va - Vr / Ve$	126.1705	44%	126.17	
1.2. Inversión	$I = (Va + Vr) \times i / 2 Ha$	49.3958	17%	49.40	
1.3. Seguros	$S = (Va + Vr) \times s / 2 Ha$	10.2198	4%	10.22	
1.4. Mantenimiento	$T = Q \times D$	100.9364	35%	100.94	
SUMA		286.7226	100%	286.72	62%

2. CONSUMOS

CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCIÓN	%	COSTO	%
2.1. Combustibles	$E = C \times Po \times Pc$				
Diesel	$E = 0.20 \times Po \times Pc$	131.1300	87%	131.13	
Gasolina	$E = 0.24 \times Po \times Pc$	0.0000		0.00	
2.2. Otras Fuentes de Energía		0.0000			
2.3. Lubricantes de Motor	$Al = (c + al) \times PI$	19.3770	13%	19.38	
Potencia > 100 HP	$c = 0.0035 \times HP \times Po$	0.9765			
Capacidad del Carter	$al = cc / ca$	0.3900			
Cambios de Aceite	cc	39.0000			
Llantas	ca	100.0000			
Valor de las Llantas	$N = Vn / Hv$	0.0000	0%	0.00	
Vida Económica	Vn	0.0000			
Horas por Año	Hv	0.0000			
SUMA			100%	150.51	33%

3. OPERACION

CONCEPTO	FORMULA	SUSTITUCIÓN	COSTO	%
3.1. Operación	$Co = So / fH$	23.4721	23.47	100%
Salario Integrado por Turno	So	159.6100		
Horas por Turno	H	8.0000		
Factor de Rendimiento	f	0.8500		
SUMA			23.47	5%
COSTO DIRECTO HORA MAQUINA			460.70	100%



<b>MAQUINA</b>	Cargador frontal (3 ton) Incluye escarificador	Fecha: octubre de 1997			
<b>DATOS GENERALES</b>					
Valor de Adquisición	272000.00				
Valor de Llantas	16000.00	Potencia 80.00 HP			
Valor Inicial (Va)	256000.00	Factor de Operación 0.90			
Valor de Rescate (Vr)	20% 51200.00	Potencia de Operación (Po) 72.00 HP			
Tasa de Interés (i)	9% 22272.00	Coefficiente de Almacenaje 0.00			
Prima de Seguros (s)	2% 4608.00	Factor de Mantenimiento(Q) 0.80			
Vida Económica (Ve)	8000.00				
Horas por Año (Ha)	2000.00				
<b>1. CARGOS FIJOS</b>					
<b>CONCEPTO</b>	<b>FORMULA</b>	<b>SUSTITUCION</b>	<b>%</b>	<b>COSTO</b>	<b>%</b>
1.1. Depreciación	$D = Va - Vr / Ve$	25.6000	47%	25.60	
1.2. Inversión	$I = (Va + Vr) \times i / 2 Ha$	6.6816	12%	6.68	
1.3. Seguros	$S = (Va + Vr) \times s / 2 Ha$	1.3824	3%	1.38	
1.4. Mantenimiento	$T = Q \times D$	20.4800	38%	20.48	
<b>SUMA</b>		54.1440	100%	54.14	45%
<b>2. CONSUMOS</b>					
<b>CONCEPTO</b>	<b>FORMULA</b>	<b>SUSTITUCION</b>	<b>%</b>	<b>COSTO</b>	<b>%</b>
2.1. Combustibles	$E = C \times Po \times Pc$				
Diesel	$E = 0.20 \times Po \times Pc$	33.8400	75%	33.84	
Gasolina	$E = 0.24 \times Po \times Pc$	0.0000		0.00	
2.2. Otras Fuentes de Energía	-	0.0000			
2.3. Lubricantes de Motor	$Al = (c + al) \times Pl$	4.8496	11%	4.85	
Potencia > 100 HP	$c = 0.0035 \times HP Po$	0.2520			
	$al = cc / ca$	0.0900			
Capacidad del Carter	cc	9.0000			
Cambios de Aceite	ca	100.0000			
2.4. Llantas	$N = Vn / Hv$	6.4516	14%	6.45	
Valor de las Llantas	Vn	16000.0000			
Vida Económica	Hv	2480.0000			
<b>SUMA</b>			100%	45.14	38%
<b>3. OPERACION</b>					
<b>CONCEPTO</b>	<b>FORMULA</b>	<b>SUSTITUCION</b>	<b>%</b>	<b>COSTO</b>	<b>%</b>
3.1. Operación	$Co = So / fH$	19.8529	100%	19.85	
Salario Integrado por Turno	So	135.0000			
Horas por Turno	H	8.0000			
Factor de Rendimiento	f	0.8500			
<b>SUMA</b>			100%	19.85	17%
<b>COSTO DIRECTO HORA MAQUINA</b>				119.14	100%

**CUANTIFICACIONES  
y  
COSTOS**

Volumen Total de Materiales para la Construcción de los Sistemas Convencionales de Barreras Impermeables

Tipo de Sistema		Espesor	Unidad	Área	Unidad	Volumen Comp.	Unidad	Volumen en Banco	Unidad	Volumen suelto	Unidad
<b>Convencional (DPS)</b>											
10	Barrera Natural Impermeable	0.60	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	6,000.00	m <sup>3</sup>	7,221.27	m <sup>3</sup>	8,509.09	m <sup>3</sup>
	Arcilla (Cl)	0.36	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,600.00	m <sup>3</sup>	4,500.00	m <sup>3</sup>	5,400.00	m <sup>3</sup>
	Arena	0.18	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	1,800.00	m <sup>3</sup>	2,045.45	m <sup>3</sup>	2,331.82	m <sup>3</sup>
	Grava	0.06	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	600.00	m <sup>3</sup>	681.82	m <sup>3</sup>	777.27	m <sup>3</sup>
20	Barrera de Protección Compactada	0.20	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	2,000.00	m <sup>3</sup>	2,500.00	m <sup>3</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>
30	Geomembrana (HDPE)	1.50	mm	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>
40	Material de Protección (Arcilla (Cl))	0.20	m	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	2,240.70	m <sup>3</sup>
50	Capa para Drenaje	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>
<b>Totales</b>						<b>8,000.00</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	<b>16,749.79 m<sup>3</sup></b>			

<b>Convencional</b>											
10	Barrera Natural Impermeable	1.00	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	10,000.00	m <sup>3</sup>	12,045.45	m <sup>3</sup>	14,181.82	m <sup>3</sup>
	Arcilla (Cl)	0.60	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	6,000.00	m <sup>3</sup>	7,500.00	m <sup>3</sup>	9,000.00	m <sup>3</sup>
	Arena	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	3,409.09	m <sup>3</sup>	3,886.36	m <sup>3</sup>
	Grava	0.10	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	1,000.00	m <sup>3</sup>	1,136.36	m <sup>3</sup>	1,295.45	m <sup>3</sup>
20	Barrera de Protección Compactada	0.20	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	2,000.00	m <sup>3</sup>	2,500.00	m <sup>3</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>
30	Geomembrana (HDPE)	1.50	mm	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>
40	Material de Protección (Arcilla (Cl))	0.20	m	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	2,240.70	m <sup>3</sup>
50	Capa para Drenaje	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>
<b>Totales</b>						<b>12,000.00</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	<b>22,422.52 m<sup>3</sup></b>			

Volumen Total de Materiales para la Construcción de los Sistemas Dobles de Barreras Impermeables

Tipo de Sistema		Esesor	Unidad	Area	Unidad	Volumen Comp.	Unidad	Volumen en Banco	Unidad	Volumen sueto	Unidad
<b>Barrera Natural-HDPE</b>											
60	Barrera Natural Impermeable (Inferior)	0.60	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	6,000.00	m <sup>3</sup>	7,227.27	m <sup>3</sup>	8,509.09	m <sup>3</sup>
	Arcilla (CL)	0.36	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,600.00	m <sup>3</sup>	4,500.00	m <sup>3</sup>	5,400.00	m <sup>3</sup>
	Arena	0.18	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	1,800.00	m <sup>3</sup>	2,045.45	m <sup>3</sup>	2,331.82	m <sup>3</sup>
	Grava	0.06	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	600.00	m <sup>3</sup>	681.82	m <sup>3</sup>	777.27	m <sup>3</sup>
70	Barrera de Protección Compactada	0.20	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	2,000.00	m <sup>3</sup>	2,500.00	m <sup>3</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>
80	Geomembrana de HDPE	1.50	mm	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>
90	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20	m	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	2,240.70	m <sup>3</sup>
100	Capa para Drenaje	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>
110	Barrera Natural Impermeable (Superior)	0.50	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	5,000.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	7,090.91	m <sup>3</sup>
	Arcilla (CL)	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	3,750.00	m <sup>3</sup>	4,500.00	m <sup>3</sup>
	Arena	0.15	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	1,500.00	m <sup>3</sup>	1,704.55	m <sup>3</sup>	1,943.18	m <sup>3</sup>
	Grava	0.05	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	500.00	m <sup>3</sup>	568.18	m <sup>3</sup>	647.73	m <sup>3</sup>
120	Barrera de Protección Compactada	0.20	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	2,000.00	m <sup>3</sup>	2,500.00	m <sup>3</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>
130	Geomembrana de HDPE (Superior)	1.50	mm	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>
140	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20	m	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	2,240.70	m <sup>3</sup>
150	Capa para Drenaje	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>
<b>Totales</b>						15,000.00	m <sup>3</sup>			32,081.40	m <sup>3</sup>

Volumen Total de Materiales para la Construcción de los Sistemas Dobles de Barreras Impermeables

Tipo de Sistema		Esesor	Unidad	Área	Unidad	Volumen Comp.	Unidad	Volumen en Banco	Unidad	Volumen Suelto	Unidad	
<b>Arena-HDPE</b>												
160	Barrera Natural Impermeable (Inferior)	0.60	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	6,000.00	m <sup>3</sup>	7,227.27	m <sup>3</sup>	8,509.09	m <sup>3</sup>	
	Arcilla (CL)	0.36	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,600.00	m <sup>3</sup>	4,500.00	m <sup>3</sup>	5,400.00	m <sup>3</sup>	
	Arena	0.18	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	1,800.00	m <sup>3</sup>	2,045.45	m <sup>3</sup>	2,331.82	m <sup>3</sup>	
	Grava	0.06	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	600.00	m <sup>3</sup>	681.82	m <sup>3</sup>	777.27	m <sup>3</sup>	
170	Barrera de Protección Compactada	0.20	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	2,000.00	m <sup>3</sup>	2,500.00	m <sup>3</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	
180	Geomembrana de HDPE	1.50	mm	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	
190	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20	m	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	2,240.70	m <sup>3</sup>	
200	Capa para Drenaje	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	
220	Arena (Superior)	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	
230	Geomembrana de HDPE (Superior)	1.50	mm	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	
240	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20	m	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	2,240.70	m <sup>3</sup>	
250	Capa para Drenaje	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	
<b>Totales</b>						<b>8,000.00</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	<b>24,990.49</b>				<b>m<sup>3</sup></b>

Volumen Total de Materiales para la Construcción de los Sistemas Dobles de Barreras Impermeables

Tipo de Sistema		Espesor	Unidad	Área	Unidad	Volumen Comp.	Unidad	Volumen en Banco	Unidad	Volumen Sueto	Unidad	
<b>Barrera de Bentonita- HDPE</b>												
260	Barrera Natural Impermeable (Inferior)	0.60	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	6,000.00	m <sup>3</sup>	7,227.27	m <sup>3</sup>	8,509.09	m <sup>3</sup>	
	Arcilla (CL)	0.36	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,600.00	m <sup>3</sup>	4,500.00	m <sup>3</sup>	5,400.00	m <sup>3</sup>	
	Arena	0.18	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	1,800.00	m <sup>3</sup>	2,045.45	m <sup>3</sup>	2,331.82	m <sup>3</sup>	
	Grava	0.06	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	600.00	m <sup>3</sup>	681.82	m <sup>3</sup>	777.27	m <sup>3</sup>	
270	Barrera de Protección Compactada	0.20	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	2,000.00	m <sup>3</sup>	2,500.00	m <sup>3</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	
280	Geomembrana de HDPE	1.50	mm	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	2,240.70	m <sup>3</sup>	
290	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20	m	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	
300	Capa para Drenaje	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	
310	Geored	3.00	mm	11,600.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	
320	Geomembrana de Bentonita (Superior)	2.00	mm	11,495.22	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	
330	Geomembrana de HDPE (Superior)	1.50	mm	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	2,240.70	m <sup>3</sup>	
340	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20	m	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	
350	Geomalla	5.00	mm	10,062.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	1,000.00	m <sup>3</sup>	
360	Capa para Drenaje	0.10	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	
<b>Totales</b>							<b>8,000.00</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	<b>19,990.49</b>			<b>m<sup>3</sup></b>

Volumen Total de Materiales para la Construcción de los Sistema de Cubierta

Tipo de Sistema	Espesor	Unidad	Área	Unidad	Volumen Comp.	Unidad	Volumen en Banco	Unidad	Volumen suelo	Unidad
<i>Tradicional</i>										
500	Cubierta de Suelo Mezclado	0.30 m	10,000.00 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	0.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	0.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	3,000.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
510	Capa para Drenaje	0.30 m	10,000.00 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	0.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	0.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	3,000.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
520	Barrera Natural Impermeable	0.30 m	10,000.00 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	3,000.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	0.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	0.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
522	Arcilla (CL)	0.18	10,000.00 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	1,800.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	2,250.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	2,700.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
525	Arena	0.09	10,000.00 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	900.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	1,027.73 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	1,165.91 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
527	Grava	0.03	10,000.00 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	300.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	340.91 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	388.64 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
530	Material para Nivelación	0.30 m	10,000.00 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	0.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	0.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	3,000.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
<b>Totales</b>										13,254.55 m <sup>3</sup>

Volumen Total de Materiales para la Construcción de los Sistema de Cubierta

Tipo de Sistema	Espesor	Unidad	Área	Unidad	Volumen Comp.	Unidad	Volumen en Banco	Unidad	Volumen suelo	Unidad
<i>Alternativo</i>										
540	Cubierta de Suelo Mezclado	0.50 m	10,000.00 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	0.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	0.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	5,000.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
550	Capa para Drenaje	0.30 m	10,000.00 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	0.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	0.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	3,000.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
560	Geomembrana de Bentonita	2.00 mm	11,495.22 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	0.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	0.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	0.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
570	Material para Nivelación	0.30 m	10,000.00 m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	0.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	0.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	3,000.00 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
<b>Totales</b>										11,000.00 m <sup>3</sup>

Volumen Total de Materiales para la Construcción de los Sistema de Cubierta

Tipo de Sistema		Esesor	Unidad	Area	Unidad	Volumen Comp.	Unidad	Volumen en Banco	Unidad	Volumen suelto	Unidad
Compuesto											
580	Cubierta de Suelo Mezclado	0.50	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	5,000.00	m <sup>3</sup>
590	Capa para Drenaje	0.05	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	500.00	m <sup>3</sup>
595	Geomalla	10.00	mm	10,062.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>
600	Geomembrana de HDPE	1.00	mm	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>
612	Geored Biaxial	3.00	mm	11,500.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>
620	Material para Nivelación	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>
Totales						0.00	m <sup>3</sup>	8,500.00 m <sup>3</sup>			



Costo Directo por Adquisición de Materiales en Sistemas Convencionales

Tipo de Sistema		Esesor	Unidad	Área	Unidad	Volumen	Unidad	Precio Unitario	Unidad	Costo Directo
<b>Convencional (OPS)</b>										
10	Barrera Natural Impermeable	0.60	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	8,509.09	m <sup>3</sup>	\$ 0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
	Arcilla (Cl)	0.36	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	5,400.00	m <sup>3</sup>	\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 204,012.00
	Arena	0.18	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	2,331.82	m <sup>3</sup>	\$ 58.73	m <sup>3</sup>	\$ 136,947.79
	Grava	0.06	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	777.27	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 40,550.18
	Agua	0.10	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>			1,185.44	m <sup>3</sup>	\$ 15.25	m <sup>3</sup>	\$ 18,077.90
20	Barrera de Protección Compactada	0.20	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 113,340.00
30	Geomembrana (HDPE)	1.50	mm	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 32.63	m <sup>2</sup>	\$ 365,570.21
40	Material de Protección (Arcilla (Cl))	0.20	m	11,203.50	m <sup>2</sup>	2,240.70	m <sup>3</sup>	\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 84,653.65
50	Capa para Drenaje	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
<b>Totales</b>										<b>\$ 1,119,661.72</b>

Tipo de Sistema		Esesor	Unidad	Área	Unidad	Volumen	Unidad	Precio Unitario	Unidad	Costo Directo
<b>Convencional</b>										
10	Barrera Natural Impermeable	1.00	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	14,181.81	m <sup>3</sup>	\$ 0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
	Arcilla (Cl)	0.60	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	9,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 340,020.00
	Arena	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,886.36	m <sup>3</sup>	\$ 58.73	m <sup>3</sup>	\$ 228,245.92
	Grava	0.10	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	1,295.45	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 67,583.63
	Agua	0.10	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>			1,769.73	m <sup>3</sup>	\$ 15.25	m <sup>3</sup>	\$ 26,988.33
20	Barrera de Protección Compactada	0.20	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 113,340.00
30	Geomembrana (HDPE)	1.50	mm	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 32.63	m <sup>2</sup>	\$ 365,570.21
40	Material de Protección (Arcilla (Cl))	0.20	m	11,203.50	m <sup>2</sup>	2,240.70	m <sup>3</sup>	\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 84,653.65
50	Capa para Drenaje	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
<b>Totales</b>										<b>\$ 1,382,911.73</b>

Costos Directos por Adquisición de Materiales para Barreras Dobles

Tipo de Sistema		Espesor	Unidad	Área	Unidad	Volumen Suelto	Unidad	Precio Unitario	Unidad	Costo Directo
Barrera Natural-HDPE										
60	Barrera Natural Impermeable (Inferior)	0.60 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		8,509.09 m <sup>3</sup>		\$ 0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
	Arcilla (Cl)	0.36 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		5,400.00 m <sup>3</sup>		\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 204,012.00
	Arena	0.18 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		2,331.82 m <sup>3</sup>		\$ 58.73	m <sup>3</sup>	\$ 136,947.79
	Grava	0.06 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		777.27 m <sup>3</sup>		\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 40,550.18
	Agua	0.10 m3/m3				1,185.44 m <sup>3</sup>		\$ 15.25	m <sup>3</sup>	\$ 18,077.90
70	Barrera de Protección Compactada	0.20 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		3,000.00 m <sup>3</sup>		\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 113,340.00
80	Geomembrana de HDPE	1.50 mm		11,203.50 m <sup>2</sup>		0.00 m <sup>3</sup>		\$ 32.63	m <sup>2</sup>	\$ 365,570.21
90	Material de Protección (Arcilla (Cl))	0.20 m		11,203.50 m <sup>2</sup>		2,240.70 m <sup>3</sup>		\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 84,653.65
100	Capa para Drenaje	0.30 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		3,000.00 m <sup>3</sup>		\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
110	Barrera Natural Impermeable (Superior)	0.30 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		7,090.91 m <sup>3</sup>		\$ 0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
	Arcilla (Cl)	0.30 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		4,500.00 m <sup>3</sup>		\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 170,010.00
	Arena	0.15 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		1,943.18 m <sup>3</sup>		\$ 58.73	m <sup>3</sup>	\$ 114,122.96
	Grava	0.05 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		647.73 m <sup>3</sup>		\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 33,792.07
	Agua	0.10 m3/m3				1,039.36 m <sup>3</sup>		\$ 15.25	m <sup>3</sup>	\$ 15,850.30
120	Barrera de Protección Compactada	0.20 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		3,000.00 m <sup>3</sup>		\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 113,340.00
130	Geomembrana de HDPE (Superior)	1.50 mm		11,203.50 m <sup>2</sup>		0.00 m <sup>3</sup>		\$ 32.63	m <sup>2</sup>	\$ 365,570.21
140	Material de Protección (Arcilla (Cl))	0.20 m		11,203.50 m <sup>2</sup>		2,240.70 m <sup>3</sup>		\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 84,653.65
150	Capa para Drenaje	0.30 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		3,000.00 m <sup>3</sup>		\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
<b>Totales</b>										
<b>\$ 2,173,510.90</b>										

Costos Directos por Adquisición de Materiales para Barreras Dobles

Tipo de Sistema		Espesor	Unidad	Área	Unidad	Volumen suelto	Unidad	Precio Unitario	Unidad	Costo Directo
<b>Arena-HDPE</b>										
160	Barrera Natural Impermeable (Inferior)	0.60	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	8,509.09	m <sup>3</sup>	\$ 0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
	Arcilla (CL)	0.36	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	5,400.00	m <sup>3</sup>	\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 204,012.00
	Arena	0.18	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	2,331.82	m <sup>3</sup>	\$ 58.73	m <sup>3</sup>	\$ 136,947.79
	Grava	0.06	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	777.27	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 40,550.18
	Agua	0.10	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>			1,185.44	m <sup>3</sup>	\$ 15.25	m <sup>3</sup>	\$ 18,077.90
170	Barrera de Protección Compactada	0.20	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 113,340.00
180	Geomembrana de HDPE	1.50	mm	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 32.63	m <sup>2</sup>	\$ 365,570.21
190	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20	m	11,203.50	m <sup>2</sup>	2,240.70	m <sup>3</sup>	\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 84,653.65
200	Capa para Drenaje	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
220	Arena (Superior)	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 58.73	m <sup>3</sup>	\$ 176,190.00
230	Geomembrana de HDPE (Superior)	2.00	mm	10,457.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 32.63	m <sup>3</sup>	\$ 341,211.91
240	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	2,240.70	m <sup>3</sup>	\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 84,653.65
250	Capa para Drenaje	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
<b>Totales</b>										<b>\$ 1,878,227.27</b>



Costo Directo por Materiales para los Sistema de Cubierta

Tipo de Sistema		Esesor	Unidad	Área	Unidad	Volumen sueto	Unidad	Precio Unitario	Unidad	Costo Directo
<b>Tradicional</b>										
500	Cubierta de Suelo Mezclado	0.30 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		3,000.00 m <sup>3</sup>		\$ 49.56	m <sup>3</sup>	\$ 148,680.00
510	Capa de Drenaje y Protección	0.30 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		3,000.00 m <sup>3</sup>		\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
520	Barrera Natural Impermeable	0.30 m		30,000.00 m <sup>2</sup>		4,254.55 m <sup>3</sup>		\$ 0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
522	Arcilla (Cl)	0.18 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		2,700.00 m <sup>3</sup>		\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 102,006.00
525	Arena	0.09 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		1,165.91 m <sup>3</sup>		\$ 58.73	m <sup>3</sup>	\$ 68,473.89
527	Grava	0.03 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		388.64 m <sup>3</sup>		\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 20,275.35
529	Agua			0.10 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>		438.22 m <sup>3</sup>		\$ 15.25	m <sup>3</sup>	\$ 6,682.83
530	Material para Nivelación	0.30 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		3,000.00 m <sup>3</sup>		\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
<b>Totales</b>										<b>\$ 659,138.08</b>

Costo Directo por Materiales para los Sistema de Cubierta

Tipo de Sistema		Esesor	Unidad	Área	Unidad	Volumen sueto	Unidad	Precio Unitario	Unidad	Costo Directo
<b>Alternativo</b>										
500	Cubierta de Suelo Mezclado	0.50 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		5,000.00 m <sup>3</sup>		\$ 49.56	m <sup>3</sup>	\$ 247,800.00
510	Capa de Drenaje y Protección	0.30 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		3,000.00 m <sup>3</sup>		\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
520	Geomembrana de Bentonita	2.00 mm		11,495.22 m <sup>2</sup>		0.00 m <sup>3</sup>		\$ 56.00	m <sup>2</sup>	\$ 643,732.32
530	Material para Nivelación	0.30 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		3,000.00 m <sup>3</sup>		\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
<b>Totales</b>										<b>\$ 1,204,552.32</b>

Costo Directo por Materiales para los Sistema de Cubierta

Tipo de Sistema		Espeor	Unidad	Área	Unidad	Volumen suelto	Unidad	Precio Unitario	Unidad	Costo Directo
Compuesto										
580	Cubierta de Suelo Mezclado	0.50	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	5,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 49.56	m <sup>3</sup>	\$ 247,800.00
590	Capa de Drenaje y Protección	0.05	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	500.00	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 26,085.00
595	Geomalla	10.00	mm	10,062.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 32.00	m <sup>2</sup>	\$ 321,984.00
600	Geomembrana de HDPE	1.00	mm	10,457.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 28.32	m <sup>2</sup>	\$ 296,142.24
612	Geored Biaxial	3.00	mm	11,600.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 32.00	m <sup>2</sup>	\$ 371,200.00
620	Material para Nivelación	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
<b>Totales</b>										
<b>\$ 1,419,721.24</b>										

Costo Directo por Actividades para la Construcción de los Sistemas Convencionales en la Base del Relleno Sanitario

	Actividad	Precio Unitario (PU)	Tipo de Sistema					
			Convencional (OPS)			Convencional		
			Cantidad	Unidad	Costo Directo	Cantidad	Unidad	Costo Directo
1000	Extracción y Carga de Materiales para el Relleno	4.22 \$/m <sup>3</sup>	16,749.79	m <sup>3</sup>	\$ 70,684.12	22,422.52	m <sup>3</sup>	\$ 94,623.03
	Acarreo de Material (1er km)	1.76 \$/m <sup>3</sup>	16,749.79	m <sup>3</sup>	\$ 29,479.63	22,422.52	m <sup>3</sup>	\$ 39,463.63
	Acarreo de Material (km subsecuentes)	9.05 \$/m <sup>3</sup>	16,749.79	m <sup>3</sup>	\$ 151,585.61	22,422.52	m <sup>3</sup>	\$ 202,923.79
2000	Despalme y Limpieza	4.37 \$/m <sup>3</sup>	2,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 8,740.00	2,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 8,740.00
3000	Trazo y Nivelación	0.15 \$/m <sup>2</sup>	10,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 1,500.00	10,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 1,500.00
4000	Material Tendido en Capas de 20cm	3.44 \$/m <sup>3</sup>	16,749.79	m <sup>3</sup>	\$ 57,619.28	22,422.52	m <sup>3</sup>	\$ 77,133.46
5000	Incorporación del Agua	1.42 \$/m <sup>3</sup>	1,185.44	m <sup>3</sup>	\$ 1,683.32	1,769.73	m <sup>3</sup>	\$ 2,513.01
6000	Compactación del Material en la Base	4.05 \$/m <sup>3</sup>	5,360.73	m <sup>3</sup>	\$ 21,710.94	8,934.55	m <sup>3</sup>	\$ 36,184.91
6100	Compactación del Material en el Talud	6.17 \$/m <sup>3</sup>	3,148.36	m <sup>3</sup>	\$ 19,425.40	5,247.27	m <sup>3</sup>	\$ 32,375.68
7000	Escarificación entre Capas	0.05 \$/m <sup>2</sup>	60,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 3,000.00	90,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 4,500.00
8000	Compactación de la Barrera Protectora	2.07 \$/m <sup>3</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 6,210.00	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 6,210.00
9000	Colocación de la Geomembrana (HDPE)	0.64 \$/m <sup>2</sup>	11,203.50	m <sup>2</sup>	\$ 7,170.24	11,203.50	m <sup>2</sup>	\$ 7,170.24
10000	Colocación de la Geomembrana (Bentonita)	0.04 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
11000	Colocación del Geomalla	0.45 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
12000	Colocación del Geored	0.46 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
<b>Totales</b>					<b>\$ 378,808.54</b>			<b>\$ 513,337.75</b>

Costo Directo por Actividades para la Construcción de los Sistemas Dobles en la Base del Relleno Sanitario

	Actividad	Precio Unitario	Tipo de Sistema		
			Cantidad	Unidad	Costo Directo
			Barrera Natural- HDPE		
1000	Extracción y Carga de Material para el Relleno	4.22 \$/m <sup>3</sup>	32,081.40	m <sup>3</sup>	\$ 135,383.51
	Acarreo de Material (1er km)	1.76 \$/m <sup>3</sup>	32,081.40	m <sup>3</sup>	\$ 56,463.26
	Acarreo de Material (km subsiguientes)	9.05 \$/m <sup>3</sup>	32,081.40	m <sup>3</sup>	\$ 290,336.67
2000	Despalme y Limpieza	4.37 \$/m <sup>2</sup>	2,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 8,740.00
3000	Trazo y Nivelación	0.15 \$/m <sup>2</sup>	10,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 1,500.00
4000	Material Tendido en Capas de 20cm	3.44 \$/m <sup>3</sup>	32,081.40	m <sup>3</sup>	\$ 110,360.02
5000	Incorporación del Agua	1.42 \$/m <sup>3</sup>	2,224.80	m <sup>3</sup>	\$ 3,159.22
6000	Compactación del Material en la Base	4.05 \$/m <sup>3</sup>	9,828.00	m <sup>3</sup>	\$ 39,803.40
6100	Compactación del Material en el Talud	6.17 \$/m <sup>3</sup>	5,772.00	m <sup>3</sup>	\$ 35,613.24
7000	Escarificación entre Capas	0.05 \$/m <sup>2</sup>	110,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 5,500.00
8000	Compactación de la Barrera Protectora	2.07 \$/m <sup>3</sup>	6,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 12,420.00
9000	Colocación de la Geomembrana (HDPE)	0.64 \$/m <sup>2</sup>	22,407.00	m <sup>2</sup>	\$ 14,340.48
10000	Colocación de la Geomembrana (Bentonita)	0.04 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
11000	Colocación del Geomalla	0.45 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
12000	Colocación del Geored	0.46 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
<b>Totales</b>					<b>\$ 713,619.79</b>



	Actividad	Precio Unitario	Tipo de Sistema		
			Cantidad	Unidad	Costo Directo
1000	Extracción y Carga de Material para el Relleno	4.22 \$/m <sup>3</sup>	24,990.49	m <sup>3</sup>	\$ 105,459.87
	Acarreo de Material (1er km)	1.76 \$/m <sup>3</sup>	24,990.49	m <sup>3</sup>	\$ 43,983.26
	Acarreo de Material (km subsiguientes)	9.05 \$/m <sup>3</sup>	24,990.49	m <sup>3</sup>	\$ 226,163.94
2000	Despalme y Limpieza	4.37 \$/m <sup>3</sup>	2,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 8,740.00
3000	Trazo y Nivelación	0.15 \$/m <sup>2</sup>	10,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 1,500.00
4000	Material Tendido en Capas de 20cm	3.44 \$/m <sup>3</sup>	24,990.49	m <sup>3</sup>	\$ 85,967.29
5000	Incorporación del Agua	1.42 \$/m <sup>3</sup>	1,185.44	m <sup>3</sup>	\$ 1,683.32
6000	Compactación del Material en la Base	4.05 \$/m <sup>3</sup>	5,360.73	m <sup>3</sup>	\$ 21,710.94
6100	Compactación del Material en el Talud	6.17 \$/m <sup>3</sup>	3,148.36	m <sup>3</sup>	\$ 19,425.40
7000	Escarificación entre Capas	0.05 \$/m <sup>2</sup>	60,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 3,000.00
8000	Compactación de la Barrera Protectora	2.07 \$/m <sup>3</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 6,210.00
9000	Colocación de la Geomembrana (HDPE)	0.64 \$/m <sup>2</sup>	22,407.00	m <sup>2</sup>	\$ 14,340.48
10000	Colocación de la Geomembrana (Bentonita)	0.04 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
11000	Colocación del Geomalla	0.45 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
12000	Colocación del Geored	0.46 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
<b>Totales</b>					<b>\$ 538,184.51</b>

**Costo Directo por Actividades para la Construcción de los Sistemas Dobles en la Base del Relleno Sanitario**

	Actividad	Precio		Tipo de Sistema		
		Unitario		Cantidad	Unidad	Costo Directo
1000	Extracción y Carga de Material para el Relleno	4.22 \$/m <sup>3</sup>		19,990.49 m <sup>3</sup>		\$ 84,359.87
	Acarreo de Material (1er km)	1.76 \$/m <sup>3</sup>		19,990.49 m <sup>3</sup>		\$ 35,183.26
	Acarreo de Material (km subsiguientes)	9.05 \$/m <sup>3</sup>		19,990.49 m <sup>3</sup>		\$ 180,913.94
2000	Despalme y Limpieza	4.37 \$/m <sup>3</sup>		2,000.00 m <sup>3</sup>		\$ 8,740.00
3000	Trazo y Nivelación	0.15 \$/m <sup>2</sup>		10,000.00 m <sup>2</sup>		\$ 1,500.00
4000	Material Tendido en Capas de 20cm	3.44 \$/m <sup>3</sup>		19,990.49 m <sup>3</sup>		\$ 68,767.29
5000	Incorporación del Agua	1.42 \$/m <sup>3</sup>		1,185.44 m <sup>3</sup>		\$ 1,683.32
6000	Compactación del Material en la Base	4.05 \$/m <sup>3</sup>		5,360.73 m <sup>3</sup>		\$ 21,710.94
6100	Compactación del Material en el Talud	6.17 \$/m <sup>3</sup>		3,148.36 m <sup>3</sup>		\$ 19,425.40
7000	Escarificación entre Capas	0.05 \$/m <sup>2</sup>		60,000.00 m <sup>2</sup>		\$ 3,000.00
8000	Compactación de la Barrera Protectora	2.07 \$/m <sup>3</sup>		3,000.00 m <sup>3</sup>		\$ 6,210.00
9000	Colocación de la Geomembrana (HDPE)	0.64 \$/m <sup>2</sup>		22,407.00 m <sup>2</sup>		\$ 14,340.48
10000	Colocación de la Geomembrana (Bentonita)	0.04 \$/m <sup>2</sup>		11,495.22 m <sup>2</sup>		\$ 459.81
11000	Colocación del Geomalla	0.45 \$/m <sup>2</sup>		10,062.00 m <sup>2</sup>		\$ 4,527.90
12000	Colocación del Geored	0.46 \$/m <sup>2</sup>		11,600.00 m <sup>2</sup>		\$ 5,336.00
<b>Totales</b>						<b>\$ 456,158.22</b>

Costo Directo por Actividades para la Construcción de los Sistemas de Cubierta

	Actividad	Precio Unitario	Tipo de Sistema Tradicional		Costo Directo
			Cantidad	Unidad	
1000	Extracción y Carga del Material para el Relleno	4.22 \$/m <sup>3</sup>	13,254.55	m <sup>3</sup>	\$ 55,934.18
	Acarreo de Material (1er km)	1.76 \$/m <sup>3</sup>	13,254.55	m <sup>3</sup>	\$ 23,328.00
	Acarreo de Material (km subsiguientes)	9.05 \$/m <sup>3</sup>	13,254.55	m <sup>3</sup>	\$ 119,953.64
2000	Despalme y Limpieza	4.37 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
3000	Trazo y Nivelación	0.15 \$/m <sup>2</sup>	10,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 1,500.00
4000	Material Tendido en Capas de 20cm	3.44 \$/m <sup>3</sup>	13,254.55	m <sup>3</sup>	\$ 45,595.64
5000	Incorporación del Agua	1.42 \$/m <sup>3</sup>	438.22	m <sup>3</sup>	\$ 622.27
6000	Compactación del Material en la Base	4.05 \$/m <sup>3</sup>	4,254.55	m <sup>3</sup>	\$ 17,230.93
6100	Compactación del Material en el Talud	6.17 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
7000	Escarificación entre Capas	0.05 \$/m <sup>2</sup>	20,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 1,000.00
8000	Compactación de la Barrera Protectora	2.07 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
9000	Colocación de la Geomembrana (HDPE)	0.64 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
10000	Colocación de la Geomembrana (Bentonita)	0.04 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
11000	Colocación del Geomalla	0.45 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
12000	Colocación del Geored	0.46 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
<b>Totales</b>					<b>\$ 265,164.65</b>

Costo Directo por Actividades para la Construcción de los Sistemas de Cubierta

	Actividad	Precio Unitario	Tipo de Sistema Alternativo		
			Cantidad	Unidad	Costo Directo
1000	Extracción y Carga del Material para el Relleno	4.22 \$/m <sup>3</sup>	11,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 46,420.00
	Acarreo de Material (1er km)	1.76 \$/m <sup>3</sup>	11,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 19,360.00
	Acarreo de Material (km subsiguientes)	9.05 \$/m <sup>3</sup>	11,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 99,550.00
2000	Despalme y Limpieza	4.37 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
3000	Trazo y Nivelación	0.15 \$/m <sup>2</sup>	10,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 1,500.00
4000	Material Tendido en Capas de 20cm	3.44 \$/m <sup>3</sup>	11,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 37,840.00
5000	Incorporación del Agua	1.42 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
6000	Compactación del Material en la Base	4.05 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
6100	Compactación del Material en el Talud	6.17 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
7000	Escarificación entre Capas	0.05 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
8000	Compactación de la Barrera Protectora	2.07 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
9000	Colocación de la Geomembrana (HDPE)	0.64 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
10000	Colocación de la Geomembrana (Bentonita)	0.04 \$/m <sup>2</sup>	11,495.22	m <sup>2</sup>	\$ 459.81
11000	Colocación del Geomalla	0.45 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
12000	Colocación del Geored	0.46 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
<b>Totales</b>					<b>\$ 205,129.81</b>

Costo Directo por Actividades para la Construcción de los Sistemas de Cubierta

	Actividad	Precio Unitari	Tipo de Sistema		
			Cantidad	Unidad	Costo Directo
1000	Extracción y Carga del Material para el Relleno	4.22 \$/m <sup>3</sup>	8,500.00	m <sup>3</sup>	\$ 35,870.00
	Acarreo de Material (1er km)	1.76 \$/m <sup>3</sup>	8,500.00	m <sup>3</sup>	\$ 14,960.00
	Acarreo de Material (km subsiguientes)	9.05 \$/m <sup>3</sup>	8,500.00	m <sup>3</sup>	\$ 76,925.00
2000	Despalme y Limpieza	4.37 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
3000	Trazo y Nivelación	0.15 \$/m <sup>2</sup>	10,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 1,500.00
4000	Material Tendido en Capas de 20cm	3.44 \$/m <sup>3</sup>	8,500.00	m <sup>3</sup>	\$ 29,240.00
5000	Incorporación del Agua	1.42 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
6000	Compactación del Material en la Base	4.05 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
6100	Compactación del Material en el Talud	6.17 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
7000	Escarificación entre Capas	0.05 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
8000	Compactación de la Barrera Protectora	2.07 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
9000	Colocación de la Geomembrana (HDPE)	0.64 \$/m <sup>2</sup>	11,203.50	m <sup>2</sup>	\$ 7,170.24
10000	Colocación de la Geomembrana (Bentonita)	0.04 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
11000	Colocación del Geomalla	0.45 \$/m <sup>2</sup>	10,062.00	m <sup>2</sup>	\$ 4,527.90
12000	Colocación del Geored	0.46 \$/m <sup>2</sup>	11,600.00	m <sup>2</sup>	\$ 5,336.00
<b>Totales</b>					<b>\$ 175,529.14</b>

Costo Directo por Adquisición de Materiales en Sistemas Convencionales Considerando el Uso de la Arcilla del Lugar

Tipo de Sistema		Espesor	Unidad	Área	Unidad	Volumen suelto	Unidad	Precio Unitario	Unidad	Costo Directo
<b>Convencional (OPS)</b>										
10	Barrera Natural Impermeable	0.60 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		3,109.09 m <sup>3</sup>		\$ 0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
	Arcilla (Cl)	0.36 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		0.00 m <sup>3</sup>		\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
	Arena	0.18 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		2,331.82 m <sup>3</sup>		\$ 58.73	m <sup>3</sup>	\$ 136,947.79
	Grava	0.06 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		777.27 m <sup>3</sup>		\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 40,550.18
	Agua	0.10 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>				1,185.44 m <sup>3</sup>		\$ 15.25	m <sup>3</sup>	\$ 18,077.96
20	Barrera de Protección Compactada	0.20 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		0.00 m <sup>3</sup>		\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
30	Geomembrana (HDPE)	1.50 mm		11,203.50 m <sup>2</sup>		0.00 m <sup>3</sup>		\$ 32.63	m <sup>2</sup>	\$ 365,570.21
40	Material de Protección (Arcilla (Cl))	0.20 m		11,203.50 m <sup>2</sup>		0.00 m <sup>3</sup>		\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
50	Capa para Drenaje	0.30 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		3,000.00 m <sup>3</sup>		\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
<b>Totales</b>										<b>\$ 717,656.13</b>

Tipo de Sistema		Espesor	Unidad	Área	Unidad	Volumen suelto	Unidad	Precio Unitario	Unidad	Costo Directo
<b>Convencional</b>										
10	Barrera Natural Impermeable	1.00 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		14,181.81 m <sup>3</sup>		\$ 0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
	Arcilla (Cl)	0.60 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		0.00 m <sup>3</sup>		\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
	Arena	0.30 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		3,886.36 m <sup>3</sup>		\$ 58.73	m <sup>3</sup>	\$ 228,245.92
	Grava	0.10 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		1,295.45 m <sup>3</sup>		\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 67,583.63
	Agua	0.10 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>				1,769.73 m <sup>3</sup>		\$ 15.25	m <sup>3</sup>	\$ 26,988.38
20	Barrera de Protección Compactada	0.20 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		0.00 m <sup>3</sup>		\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
30	Geomembrana (HDPE)	1.50 mm		11,203.50 m <sup>2</sup>		0.00 m <sup>3</sup>		\$ 32.63	m <sup>2</sup>	\$ 365,570.21
40	Material de Protección (Arcilla (Cl))	0.20 m		11,203.50 m <sup>2</sup>		0.00 m <sup>3</sup>		\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
50	Capa para Drenaje	0.30 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		3,000.00 m <sup>3</sup>		\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
<b>Totales</b>										<b>\$ 844,898.14</b>

Costos Directos por Adquisición de Materiales para Barreras Dobles Considerando el Uso de la Arcilla del Lugar

Tipo de Sistema		Esesor	Unidad	Área	Unidad	Volumen	Unidad	Precio Unitario	Unidad	Costo Directo
<b>Barrera Natural-HDPE</b>										
60	Barrera Natural Impermeable (Inferior)	0.60	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,109.09	m <sup>3</sup>	\$ 0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
	Arcilla (CL)	0.36	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
	Arena	0.18	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	2,331.82	m <sup>3</sup>	\$ 58.73	m <sup>3</sup>	\$ 136,947.79
	Grava	0.06	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	777.27	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 40,550.18
	Agua	0.10	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>			1,185.44	m <sup>3</sup>	\$ 15.25	m <sup>3</sup>	\$ 18,077.96
70	Barrera de Protección Compactada	0.20	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
80	Geomembrana de HDPE	1.50	mm	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 32.63	m <sup>2</sup>	\$ 365,570.21
90	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20	m	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
100	Capa para Drenaje	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
110	Barrera Natural Impermeable (Superior)	0.50	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	2,590.91	m <sup>3</sup>	\$ 0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
	Arcilla (CL)	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
	Arena	0.15	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	1,943.18	m <sup>3</sup>	\$ 58.73	m <sup>3</sup>	\$ 114,122.96
	Grava	0.05	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	647.73	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 33,792.07
	Agua	0.10	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>			1,039.36	m <sup>3</sup>	\$ 15.25	m <sup>3</sup>	\$ 15,850.24
120	Barrera de Protección Compactada	0.20	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
130	Geomembrana de HDPE (Superior)	1.50	mm	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 32.63	m <sup>2</sup>	\$ 365,570.21
140	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20	m	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
150	Capa para Drenaje	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
<b>Totales</b>										<b>\$ 1,403,501.61</b>

Costos Directos por Adquisición de Materiales para Barreras Dobles Considerando el Uso de la Arcilla del Lugar

Tipo de Sistema		Espesor	Unidad	Área	Unidad	Volumen Suelto	Unidad	Precio Unitario	Unidad	Costo Directo
<b>Arena-HDPE</b>										
160	Barrera Natural Impermeable (Inferior)	0.60	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	8,509.09	m <sup>3</sup>	\$ 0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
	Arcilla (CL)	0.36	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
	Arena	0.18	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	2,331.82	m <sup>3</sup>	\$ 58.73	m <sup>3</sup>	\$ 136,947.79
	Grava	0.06	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	777.27	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 40,550.18
	Agua	0.10	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>			1,185.44	m <sup>3</sup>	\$ 15.25	m <sup>3</sup>	\$ 18,077.96
170	Barrera de Protección Compactada	0.20	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
180	Geomembrana de HDPE	1.50	mm	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 32.63	m <sup>2</sup>	\$ 365,570.21
190	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20	m	11,203.50	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
200	Capa para Drenaje	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
220	Arena (Superior)	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 58.73	m <sup>3</sup>	\$ 176,190.00
230	Geomembrana de HDPE (Superior)	2.00	mm	10,457.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 32.63	m <sup>2</sup>	\$ 341,211.91
240	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 58.73	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
250	Capa para Drenaje	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
<b>Totales</b>										<b>\$ 1,391,568.04</b>



Costos Directos por Adquisición de Materiales para Barreras Dobles Considerando el Uso de Arcilla del Lugar

Tipo de Sistema		Espesor	Unidad	Área	Unidad	Volumen suelto	Unidad	Precio Unitario	Unidad	Costo Directo
<b>Bentonita- HDPE</b>										
260	Barrera Natural Impermeable (Inferior)	0.60 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		8,509.09 m <sup>3</sup>		\$ 0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
	Arcilla (CL)	0.36 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		0.00 m <sup>3</sup>		\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
	Arena	0.18 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		2,331.82 m <sup>3</sup>		\$ 58.73	m <sup>3</sup>	\$ 136,947.79
	Grava	0.06 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		777.27 m <sup>3</sup>		\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 40,550.18
	Agua	0.10 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>				1,185.44 m <sup>3</sup>		\$ 15.25	m <sup>3</sup>	\$ 18,077.90
270	Barrera de Protección Compactada	0.20 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		0.00 m <sup>3</sup>		\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
280	Geomembrana de HDPE	1.50 mm		11,203.50 m <sup>2</sup>		0.00 m <sup>3</sup>		\$ 32.63	m <sup>2</sup>	\$ 365,570.21
290	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20 m		11,203.50 m <sup>2</sup>		0.00 m <sup>3</sup>		\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
300	Capa para Drenaje	0.30 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		3,000.00 m <sup>3</sup>		\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
310	Geored	3.00 mm		11,600.00 m <sup>2</sup>		0.00 m <sup>3</sup>		\$ 32.00	m <sup>2</sup>	\$ 371,200.00
320	Geomembrana de Bentonita (Superior)	2.00 mm		11,495.22 m <sup>2</sup>		0.00 m <sup>3</sup>		\$ 56.00	m <sup>2</sup>	\$ 627,396.00
330	Geomembrana de HDPE (Superior)	1.50 mm		11,203.50 m <sup>2</sup>		0.00 m <sup>3</sup>		\$ 32.63	m <sup>2</sup>	\$ 365,570.21
340	Material de Protección (Arcilla (CL))	0.20 m		11,203.50 m <sup>2</sup>		0.00 m <sup>3</sup>		\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
350	Geomalla	5.00 mm		10,062.00 m <sup>2</sup>		0.00 m <sup>3</sup>		\$ 32.00	m <sup>2</sup>	\$ 32,000.00
360	Capa para Drenaje	0.10 m		10,000.00 m <sup>2</sup>		1,000.00 m <sup>3</sup>		\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 52,170.00
<b>Totales</b>										<b>\$ 2,165,992.28</b>

Costo Directo por Materiales para los Sistema de Cubierta Considerando el Uso de Arcilla del Lugar

Tipo de Sistema		Esesor	Unidad	Área	Unidad	Volumen	Unidad	Precio Unitario	Unidad	Costo Directo
<b>Tradicional</b>										
500	Cubierta de Suelo Mezclado	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	2,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 49.56	m <sup>3</sup>	\$ 99,120.00
510	Capa de Drenaje y Protección	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
520	Barrera Natural Impermeable	0.30	m	30,000.00	m <sup>2</sup>	1,554.55	m <sup>3</sup>	\$ 0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
522	Arcilla (CL)	0.18	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 37.78	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
525	Arena	0.09	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	1,165.91	m <sup>3</sup>	\$ 58.73	m <sup>3</sup>	\$ 68,473.89
527	Grava	0.03	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	388.64	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 20,275.35
529	Agua			0.10	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	438.22	m <sup>3</sup>	\$ 15.25	m <sup>3</sup>	\$ 6,682.86
530	Material para Nivelación	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
<b>Totales</b>										<b>\$ 507,572.10</b>

Costo Directo por Materiales para los Sistema de Cubierta Considerando el Uso de Arcilla del Lugar

Tipo de Sistema		Esesor	Unidad	Área	Unidad	Volumen	Unidad	Precio Unitario	Unidad	Costo Directo
<b>Alternativo</b>										
500	Cubierta de Suelo Mezclado	0.50	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,333.33	m <sup>3</sup>	\$ 49.56	m <sup>3</sup>	\$ 165,199.83
510	Capa de Drenaje y Protección	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
520	Geomembrana de Bentonita	2.00	mm	11,495.22	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 56.00	m <sup>2</sup>	\$ 643,732.32
530	Material para Nivelación	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 156,510.00
<b>Totales</b>										<b>\$ 1,121,952.15</b>

Costo Directo por Materiales para los Sistema de Cubierta Considerando el Uso de Arcilla del Lugar

Tipo de Sistema		Esesor	Unidad	Área	Unidad	Volumen sueto	Unidad	Precio Unitario	Unidad	Costo Directo
<b>Compuesto</b>										
580	Cubierta de Suelo Mezclado	0.50	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,333.33	m <sup>3</sup>	\$ 49.56	m <sup>3</sup>	\$ 165,199.83
590	Capa de Drenaje y Protección	0.05	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	500.00	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>3</sup>	\$ 26,085.00
595	Geomalla	10.00	mm	10,062.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 32.00	m <sup>2</sup>	\$ 321,984.00
600	Geomembrana de HDPE	1.00	mm	10,457.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 28.32	m <sup>2</sup>	\$ 296,142.24
612	Geored Biaxial	3.00	mm	11,600.00	m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 32.00	m <sup>2</sup>	\$ 371,200.00
620	Material para Nivelación	0.30	m	10,000.00	m <sup>2</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 52.17	m <sup>2</sup>	\$ 156,510.00
<b>Totales</b>										<b>\$ 1,337,121.07</b>

**Costo Directo por Actividades para la Construcción de los Sistemas Convencionales en la Base del Relleno Sanitario  
Considerando el Uso de Arcilla del Lugar**

Actividad	Precio Unitario (PU)	Tipo de Sistema					
		Convencional (OP5)		Convencional		Conventional	
		Cantidad	Unidad	Costo Directo	Cantidad	Unidad	Costo Directo
1000 Extracción y Carga de Materiales para el Relleno	4.22 \$/m <sup>3</sup>	16,749.79	m <sup>3</sup>	\$ 70,684.12	22,422.52	m <sup>3</sup>	\$ 94,623.03
Acarreo de Material (1er km)	1.76 \$/m <sup>3</sup>	16,749.79	m <sup>3</sup>	\$ 29,479.63	22,422.52	m <sup>3</sup>	\$ 39,463.63
Acarreo de Material (km subsiguientes)	9.05 \$/m <sup>3</sup>	6,109.09	m <sup>3</sup>	\$ 55,287.27	8,181.82	m <sup>3</sup>	\$ 74,045.45
2000 Despalme y Limpieza	4.37 \$/m <sup>3</sup>	2,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 8,740.00	2,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 8,740.00
3000 Trazo y Nivelación	0.15 \$/m <sup>2</sup>	10,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 1,500.00	10,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 1,500.00
4000 Material Tendido en Capas de 20cm	3.44 \$/m <sup>3</sup>	16,749.79	m <sup>3</sup>	\$ 57,619.28	22,422.52	m <sup>3</sup>	\$ 77,133.46
5000 Incorporación del Agua	1.42 \$/m <sup>3</sup>	1,185.44	m <sup>3</sup>	\$ 1,683.32	1,769.73	m <sup>3</sup>	\$ 2,513.01
6000 Compactación del Material en la Base	4.05 \$/m <sup>3</sup>	5,360.73	m <sup>3</sup>	\$ 21,710.94	8,934.55	m <sup>3</sup>	\$ 36,184.91
6100 Compactación del Material en el Talud	6.17 \$/m <sup>3</sup>	3,148.36	m <sup>3</sup>	\$ 19,425.40	5,247.27	m <sup>3</sup>	\$ 32,375.68
7000 Escanificación entre Capas	0.05 \$/m <sup>2</sup>	60,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 3,000.00	90,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 4,500.00
8000 Compactación de la Barrera Protectora	2.07 \$/m <sup>3</sup>	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 6,210.00	3,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 6,210.00
9000 Colocación de la Geomembrana (HDPE)	0.64 \$/m <sup>2</sup>	11,203.50	m <sup>2</sup>	\$ 7,170.24	11,203.50	m <sup>2</sup>	\$ 7,170.24
10000 Colocación de la Geomembrana (Bentonita)	0.04 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
11000 Colocación del Geomalla	0.45 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
12000 Colocación del Geored	0.46 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
<b>Totales</b>				<b>\$ 282,510.21</b>			<b>\$ 384,459.42</b>

Costo Directo por Actividades para la Construcción de los Sistemas Dobles en la Base del Relleno Sanitario  
Considerando el Uso de la Arcilla del Lugar

	Actividad	Precio Unitario (PU)	Tipo de Sistema		
			Barrera Natural	HIDPE	
			Cantidad	Unidad	Costo Directo
1000	Extracción y Carga de Material para el Relleno	4.22 \$/m <sup>3</sup>	32,081.40	m <sup>3</sup>	\$ 135,383.51
	Acarreo de Material (1er km)	1.76 \$/m <sup>3</sup>	32,081.40	m <sup>3</sup>	\$ 56,463.26
	Acarreo de Material (km subsiguientes)	9.05 \$/m <sup>3</sup>	11,700.00	m <sup>3</sup>	\$ 105,885.00
2000	Despalme y Limpieza	4.37 \$/m <sup>3</sup>	2,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 8,740.00
3000	Trazo y Nivelación	0.15 \$/m <sup>2</sup>	10,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 1,500.00
4000	Material Tendido en Capas de 20cm	3.44 \$/m <sup>3</sup>	32,081.40	m <sup>3</sup>	\$ 110,360.02
5000	Incorporación del Agua	1.42 \$/m <sup>3</sup>	2,224.80	m <sup>3</sup>	\$ 3,159.22
6000	Compacción del Material en la Base	4.05 \$/m <sup>3</sup>	9,828.00	m <sup>3</sup>	\$ 39,803.40
6100	Compacción del Material en el Talud	6.17 \$/m <sup>3</sup>	5,772.00	m <sup>3</sup>	\$ 35,613.24
7000	Escarificación entre Capas	0.05 \$/m <sup>2</sup>	110,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 5,500.00
8000	Compacción de la Barrera Protectora	2.07 \$/m <sup>3</sup>	6,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 12,420.00
9000	Colocación de la Geomembrana (HDPE)	0.64 \$/m <sup>2</sup>	22,407.00	m <sup>2</sup>	\$ 14,340.48
10000	Colocación de la Geomembrana (Bentonita)	0.04 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
11000	Colocación del Geomalla	0.45 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
12000	Colocación del Geored	0.46 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
<b>Totales</b>					<b>\$ 529,168.12</b>

Costo Directo por Actividades para la Construcción de los Sistemas Dobles en la Base del Relleno Sanitario  
Considerando el Uso de la Arcilla del Lugar

	Actividad	Precio Unitario (PU)	Tipo de Sistema	
			Cantidad	Unidad
			Geomembranas de Bentonita-HDPE	
1000	Extracción y Carga de Material para el Relleno	4.22 \$/m <sup>3</sup>	19,990.49 m <sup>3</sup>	\$ 84,359.87
	Acarreo de Material (1er km)	1.76 \$/m <sup>3</sup>	19,990.49 m <sup>3</sup>	\$ 35,183.26
	Acarreo de Material (km subsiguientes)	9.05 \$/m <sup>3</sup>	7,109.09 m <sup>3</sup>	\$ 64,337.27
2000	Despalme y Limpieza	4.37 \$/m <sup>3</sup>	2,000.00 m <sup>3</sup>	\$ 8,740.00
3000	Trazo y Nivelación	0.15 \$/m <sup>2</sup>	10,000.00 m <sup>2</sup>	\$ 1,500.00
4000	Material Tendido en Capas de 20cm	3.44 \$/m <sup>3</sup>	19,990.49 m <sup>3</sup>	\$ 68,767.29
5000	Incorporación del Agua	1.42 \$/m <sup>3</sup>	1,185.44 m <sup>3</sup>	\$ 1,683.32
6000	Compactación del Material en la Base	4.05 \$/m <sup>3</sup>	5,360.73 m <sup>3</sup>	\$ 21,710.94
6100	Compactación del Material en el Talud	6.17 \$/m <sup>3</sup>	3,148.36 m <sup>3</sup>	\$ 19,425.40
7000	Escarificación entre Capas	0.05 \$/m <sup>2</sup>	60,000.00 m <sup>2</sup>	\$ 3,000.00
8000	Compactación de la Barrera Protectora	2.07 \$/m <sup>3</sup>	3,000.00 m <sup>3</sup>	\$ 6,210.00
9000	Colocación de la Geomembrana (HDPE)	0.64 \$/m <sup>2</sup>	22,407.00 m <sup>2</sup>	\$ 14,340.48
10000	Colocación de la Geomembrana (Bentonita)	0.04 \$/m <sup>2</sup>	11,495.22 m <sup>2</sup>	\$ 459.81
11000	Colocación de Geomalla	0.45 \$/m <sup>2</sup>	10,062.00 m <sup>2</sup>	\$ 4,527.90
12000	Colocación del Geored	0.46 \$/m <sup>2</sup>	11,600.00 m <sup>2</sup>	\$ 5,336.00
<b>Totales</b>				<b>\$ 339,581.55</b>

Costo Directo por Actividades para la Construcción de los Sistemas de Cubierta  
Considerando el Uso de la Arcilla del Lugar

	Actividad	Precio Unitario (PU)	Tipo de Sistema Tradicional		Costo Directo
			Cantidad	Unidad	
1000	Extracción y Carga del Material para el Relleno	4.22 \$/m <sup>3</sup>	13,254.55	m <sup>3</sup>	\$ 55,934.18
	Acarreo de Material (1er km)	1.76 \$/m <sup>3</sup>	13,254.55	m <sup>3</sup>	\$ 23,328.00
	Acarreo de Material (km subsiguientes)	9.05 \$/m <sup>3</sup>	9,554.55	m <sup>3</sup>	\$ 86,468.64
2000	Despalme y Limpieza	4.37 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
3000	Trazo y Nivelación	0.15 \$/m <sup>2</sup>	10,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 1,500.00
4000	Material Tendido en Capas de 20cm	3.44 \$/m <sup>3</sup>	13,254.55	m <sup>3</sup>	\$ 45,595.64
5000	Incorporación del Agua	1.42 \$/m <sup>3</sup>	438.22	m <sup>3</sup>	\$ 622.27
6000	Compactación del Material en la Base	4.05 \$/m <sup>3</sup>	4,254.55	m <sup>3</sup>	\$ 17,230.93
6100	Compactación del Material en el Talud	6.17 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
7000	Escarificación entre Capas	0.05 \$/m <sup>2</sup>	20,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 1,000.00
8000	Compactación de la Barrera Protectora	2.07 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
9000	Colocación de la Geomembrana (HDPE)	0.64 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
10000	Colocación de la Geomembrana (Bentonita)	0.04 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
11000	Colocación del Geomalla	0.45 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
12000	Colocación del Geored	0.46 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
<b>Totales</b>					<b>\$ 231,679.65</b>

Costo Directo por Actividades para la Construcción de los Sistemas de Cubierta  
Considerando el Uso de la Arcilla del Lugar

	Actividad	Precio Unitario (PU)	Tipo de Sistema		
			Cantidad	Unidad	Costo Directo
1000	Extracción y Carga del Material para el Relleno	4.22 \$/m <sup>3</sup>	11,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 46,420.00
	Acarreo de Material (1er km)	1.76 \$/m <sup>3</sup>	11,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 19,360.00
	Acarreo de Material (km subsiguientes)	9.05 \$/m <sup>3</sup>	9,333.33	m <sup>3</sup>	\$ 84,466.64
2000	Despalme y Limpieza	4.37 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
3000	Trazo y Nivelación	0.15 \$/m <sup>2</sup>	10,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 1,500.00
4000	Material Tendido en Capas de 20cm	3.44 \$/m <sup>3</sup>	11,000.00	m <sup>3</sup>	\$ 37,840.00
5000	Incorporación del Agua	1.42 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
6000	Compactación del Material en la Base	4.05 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
6100	Compactación del Material en el Talud	6.17 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
7000	Escarificación entre Capas	0.05 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
8000	Compactación de la Barrera Protectora	2.07 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
9000	Colocación de la Geomembrana (HDPE)	0.64 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
10000	Colocación de la Geomembrana (Bentonita)	0.04 \$/m <sup>2</sup>	11,495.22	m <sup>2</sup>	\$ 459.81
11000	Colocación del Geomalla	0.45 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
12000	Colocación del Geored	0.46 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
<b>Totales</b>					<b>\$ 190,046.45</b>



Costo Directo por Actividades para la Construcción de los Sistemas de Cubierta  
Considerando el Uso de la Arcilla del Lugar

	Actividad	Precio Unitario (PU)	Tipo de Sistema		
			Cantidad	Unidad	Costo Directo
1000	Extracción y Carga del Material para el Relleno	4.22 \$/m <sup>3</sup>	8,500.00	m <sup>3</sup>	\$ 35,870.00
	Acarreo de Material (1er km)	1.76 \$/m <sup>3</sup>	8,500.00	m <sup>3</sup>	\$ 14,960.00
	Acarreo de Material (km subsiguientes)	9.05 \$/m <sup>3</sup>	6,833.33	m <sup>3</sup>	\$ 61,841.64
2000	Despalme y Limpieza	4.37 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
3000	Trazo y Nivelación	0.15 \$/m <sup>2</sup>	10,000.00	m <sup>2</sup>	\$ 1,500.00
4000	Material Tendido en Capas de 20cm	3.44 \$/m <sup>3</sup>	8,500.00	m <sup>3</sup>	\$ 29,240.00
5000	Incorporación del Agua	1.42 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
6000	Compactación del Material en la Base	4.05 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
6100	Compactación del Material en el Talud	6.17 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
7000	Escarificación entre Capas	0.05 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
8000	Compactación de la Barrera Protectora	2.07 \$/m <sup>3</sup>	0.00	m <sup>3</sup>	\$ 0.00
9000	Colocación de la Geomembrana (HDPE)	0.64 \$/m <sup>2</sup>	11,203.50	m <sup>2</sup>	\$ 7,170.24
10000	Colocación de la Geomembrana (Bentonita)	0.04 \$/m <sup>2</sup>	0.00	m <sup>2</sup>	\$ 0.00
11000	Colocación del Geomalla	0.45 \$/m <sup>2</sup>	10,062.00	m <sup>2</sup>	\$ 4,527.90
12000	Colocación del Geored	0.46 \$/m <sup>2</sup>	11,600.00	m <sup>2</sup>	\$ 5,336.00
<b>Totales</b>					<b>\$ 160,445.78</b>



**RESUMEN**  
**FINAL**

Costos Directos Totales por la Construcción de los Sistemas Impermeables

Tipo de Sistema	Costo Directo por Materiales	Costo Directo por Actividades	Costo Directo Total
<b>Base Convencional</b>			
Convencional (OPS)	\$ 1,119,661.72	\$ 378,808.54	\$ 1,498,470.26
Convencional	\$ 1,382,911.73	\$ 513,337.75	\$ 1,896,249.48
<b>Base Doble</b>			
Barrera Natural-HDPE	\$ 2,173,510.90	\$ 713,619.79	\$ 2,887,130.69
Arena- HDPE	\$ 1,878,227.27	\$ 538,184.51	\$ 2,416,411.78
Bentonita- HDPE	\$ 2,652,651.57	\$ 456,158.22	\$ 3,108,809.79
<b>De Cubierta</b>			
Tradicional	\$ 659,138.08	\$ 265,164.65	\$ 924,302.73
Alternativo	\$ 1,204,552.32	\$ 205,129.81	\$ 1,409,682.13
Compuesto	\$ 1,419,721.24	\$ 175,529.14	\$ 1,595,250.38

Costos Directos Totales por la Construcción de los Sistemas Impermeables  
Considerando el Uso de Arcilla del Lugar

Tipo de Sistema	Costo Directo por Materiales	Costo Directo por Actividades	Costo Directo Total
<b>Base Convencional</b>			
Convencional (OPS)	\$ 717,656.13	\$ 282,510.21	\$ 1,000,166.34
Convencional	\$ 844,898.14	\$ 384,459.42	\$ 1,229,357.56
<b>Base Doble</b>			
Barrera Natural-HDPE	\$ 1,403,501.61	\$ 529,168.12	\$ 1,932,669.73
Arena- HDPE	\$ 1,391,568.04	\$ 421,607.84	\$ 1,813,175.88
Bentonita- HDPE	\$ 2,165,992.28	\$ 339,581.55	\$ 2,505,573.83
<b>De Cubierta</b>			
Tradicional	\$ 507,572.10	\$ 231,679.65	\$ 739,251.75
Alternativo	\$ 1,121,952.15	\$ 190,046.45	\$ 1,311,998.60
Compuesto	\$ 1,337,121.07	\$ 160,445.78	\$ 1,497,566.85

Volúmenes Disponibles Calculados por la Fórmula de una Pirámide Truncada

Tipo de Sistema	Altura de la Barrera en la Base (m)	Altura Original (m)	Altura (h) (m)	Área de la Base Mayor (m <sup>2</sup> )	Área de la Base Menor (m <sup>2</sup> )	Raíz del Producto de las Áreas (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )
Convencional (OPS)	1.30	6.00	1.57	9,532.54	3,851.44	6,059.21	30,461.00
Convencional	1.70	6.00	1.43	9,433.96	3,851.44	6,027.80	27,682.25
Doble Barrera Natural - HD	2.50	6.00	1.17	9,072.50	3,851.44	5,911.19	21,974.32
Doble Arena - HDPE	2.10	6.00	1.30	9,177.64	3,851.44	5,945.35	24,666.76
Doble Bentonita - HDPE	1.60	6.00	1.47	9,370.24	3,851.44	6,007.41	28,202.66

Costo por Disposición en la Posclausura

Sistema en la Base del Relleno	Costo del Sistema	Sistema en la Cubierta	Costo del Sistema	Costo Combinado de los Sistemas	Volumen Disponible (m3)	Costo por Disposición en la Posclausura (\$/m3)
Convencional (OPS)	\$ 1,498,470.26	Tradicional	\$ 924,302.73	\$ 2,422,772.99	30,461.00	79.54
Convencional (OPS)	\$ 1,498,470.26	Alternativo	\$ 1,409,682.13	\$ 2,908,152.39	30,461.00	95.47
Convencional (OPS)	\$ 1,498,470.26	Compuesto	\$ 1,595,250.38	\$ 3,093,720.64	30,461.00	101.56
Convencional	\$ 1,896,249.48	Tradicional	\$ 924,302.73	\$ 2,820,552.21	27,682.25	101.89
Convencional	\$ 1,896,249.48	Alternativo	\$ 1,409,682.13	\$ 3,305,931.61	27,682.25	119.42
Convencional	\$ 1,896,249.48	Compuesto	\$ 1,595,250.38	\$ 3,491,499.86	27,682.25	126.13
Doble Barrera Natural- HDPE	\$ 2,887,130.69	Tradicional	\$ 924,302.73	\$ 3,811,433.42	21,974.32	173.45
Doble Barrera Natural- HDPE	\$ 2,887,130.69	Alternativo	\$ 1,409,682.13	\$ 4,296,812.82	21,974.32	195.54
Doble Barrera Natural- HDPE	\$ 2,887,130.69	Compuesto	\$ 1,595,250.38	\$ 4,482,381.07	21,974.32	203.98
Doble Barrera Arena-HDPE	\$ 2,416,411.78	Tradicional	\$ 924,302.73	\$ 3,340,714.51	24,666.76	135.43
Doble Barrera Arena-HDPE	\$ 2,416,411.78	Alternativo	\$ 1,409,682.13	\$ 3,826,093.91	24,666.76	155.11
Doble Barrera Arena-HDPE	\$ 2,416,411.78	Compuesto	\$ 1,595,250.38	\$ 4,011,662.16	24,666.76	162.63
Doble Barrera Bentonita-HDPE	\$ 3,108,809.79	Tradicional	\$ 924,302.73	\$ 4,033,112.52	28,202.00	143.01
Doble Barrera Bentonita-HDPE	\$ 3,108,809.79	Alternativo	\$ 1,409,682.13	\$ 4,518,491.92	28,202.00	160.22
Doble Barrera Bentonita-HDPE	\$ 3,108,809.79	Compuesto	\$ 1,595,250.38	\$ 4,704,060.17	28,202.00	166.80

Costo por Disposición en la Posclausura Considerando el Uso de Arcilla del Lugar

Sistema en la Base del Relleno	Costo del Sistema	Sistema en la Cubierta	Costo del Sistema	Costo Combinado de los Sistemas	Volumen Disponible (m3)	Costo por Disposición en la Posclausura (\$/m3)
Convencional (OPS)	\$ 1,000,166.34	Tradicional	\$ 739,251.75	\$ 1,739,418.09	30,461.00	57.10
Convencional (OPS)	\$ 1,000,166.34	Alternativo	\$ 1,311,998.60	\$ 2,312,164.94	30,461.00	75.91
Convencional (OPS)	\$ 1,000,166.34	Compuesto	\$ 1,497,566.85	\$ 2,497,733.19	30,461.00	82.00
Convencional	\$ 1,229,357.56	Tradicional	\$ 739,251.75	\$ 1,968,609.31	27,682.25	71.11
Convencional	\$ 1,229,357.56	Alternativo	\$ 1,311,998.60	\$ 2,541,356.16	27,682.25	91.80
Convencional	\$ 1,229,357.56	Compuesto	\$ 1,497,566.85	\$ 2,726,924.41	27,682.25	98.51
Doble Barrera Natural- HDPE	\$ 1,932,669.73	Tradicional	\$ 739,251.75	\$ 2,671,921.48	21,974.32	121.59
Doble Barrera Natural- HDPE	\$ 1,932,669.73	Alternativo	\$ 1,311,998.60	\$ 3,244,668.33	21,974.32	147.66
Doble Barrera Natural- HDPE	\$ 1,932,669.73	Compuesto	\$ 1,497,566.85	\$ 3,430,236.58	21,974.32	156.10
Doble Barrera Arena-HDPE	\$ 1,813,175.88	Tradicional	\$ 739,251.75	\$ 2,552,427.63	24,666.76	103.48
Doble Barrera Arena-HDPE	\$ 1,813,175.88	Alternativo	\$ 1,311,998.60	\$ 3,125,174.48	24,666.76	126.70
Doble Barrera Arena-HDPE	\$ 1,813,175.88	Compuesto	\$ 1,497,566.85	\$ 3,310,742.73	24,666.76	134.22
Doble Barrera Bentonita-HDPE	\$ 2,505,573.83	Tradicional	\$ 739,251.75	\$ 3,244,825.58	28,202.00	115.06
Doble Barrera Bentonita-HDPE	\$ 2,505,573.83	Alternativo	\$ 1,311,998.60	\$ 3,817,572.43	28,202.00	135.37
Doble Barrera Bentonita-HDPE	\$ 2,505,573.83	Compuesto	\$ 1,497,566.85	\$ 4,003,140.68	28,202.00	141.95

Tabla Comparativa de los Sistemas Combinados  
Considerando el Uso de Arcilla del Lugar

Sistema Combinado	Clave	Costo por Disposición en la Posclausura (\$/m3)
Convencional (OPS) - Tradicional	A	57.10
Convencional (OPS) - Alternativo	B	75.91
Convencional (OPS) - Compuesto	C	82.00
Convencional - Tradicional	D	71.11
Convencional - Alternativo	E	91.80
Convencional - Compuesto	F	98.51
Doble Barrera Natural - HDPE - Tradicional	G	121.59
Doble Barrera Natural - HDPE - Alternativo	H	147.66
Doble Barrera Natural - HDPE - Compuesto	I	156.10
Doble Barrera Arena - HDPE - Tradicional	J	103.48
Doble Barrera Arena - HDPE - Alternativo	K	126.70
Doble Barrera Arena - HDPE - Compuesto	L	134.22
Doble Barrera Bentonita - HDPE - Tradicional	M	115.06
Doble Barrera Bentonita - HDPE - Alternativo	N	135.37
Doble Barrera Bentonita - HDPE - Compuesto	O	141.95

Tabla Comparativa de los Sistemas Combinados

Sistema Combinado	Clave	Costo por Disposición en la Posclausura (\$/m3)
Convencional (OPS) - Tradicional	A	79.54
Convencional (OPS) - Alternativo	B	95.47
Convencional (OPS) - Compuesto	C	101.56
Convencional - Tradicional	D	101.89
Convencional - Alternativo	E	119.42
Convencional - Compuesto	F	126.13
Doble Barrera Natural - HDPE - Tradicional	G	173.45
Doble Barrera Natural - HDPE - Alternativo	H	195.54
Doble Barrera Natural - HDPE - Compuesto	I	203.98
Doble Barrera Arena - HDPE - Tradicional	J	135.43
Doble Barrera Arena - HDPE - Alternativo	K	155.11
Doble Barrera Arena - HDPE - Compuesto	L	162.63
Doble Barrera Bentonita - HDPE - Tradicional	M	143.01
Doble Barrera Bentonita - HDPE - Alternativo	N	160.22
Doble Barrera Bentonita - HDPE - Compuesto	O	166.80