



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIDAD ZACATENCO



SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“Aplicación de un estabilizador de suelo, como material impermeable, al nivel de desplante de un relleno sanitario”

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN
INGENIERÍA CIVIL

P R E S E N T A:

MIGUEL ANGEL CONTRERAS CAMACHO

DIRECTOR DE TESIS:

M. en I. FELIPE LÓPEZ SÁNCHEZ

MÉXICO, DISTRITO FEDERAL

JUNIO DE 2011



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México D. F., siendo las 16:00 horas del día 22 del mes de junio del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.A. – U. Z. para examinar la tesis titulada:

“Aplicación de un estabilizador de suelo, como material impermeable, al nivel de desplante de un relleno sanitario”

Presentada por el alumno:

Contreras
Apellido paterno

Camacho
Apellido materno

Miguel Angel
Nombre(s)

Con registro:

A	0	9	0	6	8	3
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis


M. en I. Felipe López Sánchez


Dr. Jorge Meléndez Estrada

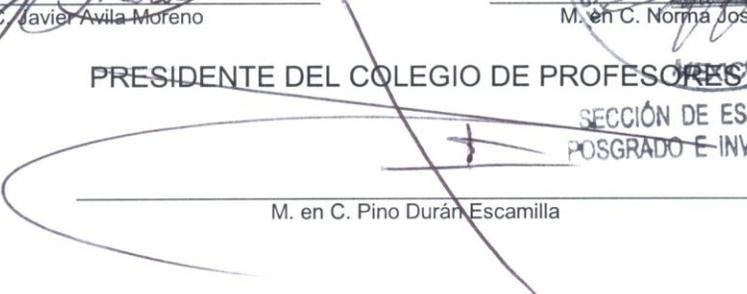

M. en C. Ricardo Contreras Contreras

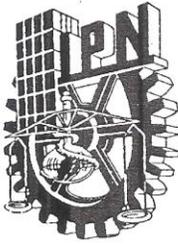

M. en C. Javier Avila Moreno


M. en C. Norma Josefina Ruiz Castillejos

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN


M. en C. Pino Durán Escamilla



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F., el día **22** del mes de **Junio** del año **2011**, el que suscribe **Miguel Angel Contreras Camacho** alumno del Programa de **Maestría en Ingeniería Civil** con número de registro **A090683**, adscrito a la **Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco**, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **M. en I. Felipe López Sánchez** y cede los derechos del trabajo intitulado: **“Aplicación de un estabilizador de suelo, como material impermeable, al nivel de desplante de un relleno sanitario”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: **macc2320@yahoo.com.mx**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Ing. Miguel Angel Contreras Camacho



AGRADECIMIENTOS.

Gracias a **Dios** por darme la familia que tengo y por brindarme la dicha de poder concluir ésta importante etapa de mi vida.

A mi **Madre** que ha dedicado gran parte de su vida en cuidados y atenciones a mis hermanas y a mí, con muchos esfuerzos y sacrificios, pero sobre todo por su amor y comprensión.

A mi **Padre** que me ha enseñado, aconsejado y apoyado en todo momento; mi respeto y admiración.

A mi **Abuelita** que me abrió las puertas de su casa desde que llegué a este mundo y que me ha enseñado cosas valiosas de esta vida. A mi abuelito **Ricardo** que no tuve la fortuna de conocerlo; donde quiera que se encuentre, sé muy bien que forma parte de esta alegría.

A mis **abuelos** todo mi cariño.

A **Nayeli y Patricia**, por vivir momentos inolvidables a mi lado y sobre todo por estar unidos en los buenos y en los malos momentos. Esto es para ustedes.

A todos mis tíos y tías, en especial a mis **Padrinos** que me han apoyado y encaminado en todos los años de mi vida y que han cosechado en mí cosas muy valiosas que hoy comienzan a dar excelentes frutos. A toda mi familia le dedico este logro.

A **Tania Juárez G.** por todo su tiempo, apoyo y comprensión brindado en este largo camino de la Maestría. ¡Muchas Gracias!

A mis estimados Profesores: **Norma Ruíz, Felipe López, Ricardo Contreras, Javier Avila y Jorge Meléndez** por compartir conmigo todos sus conocimientos; por formarme profesionalmente y obsequiarme su tiempo valioso para poder concluir este proceso tan importante en mi carrera.



“Aplicación de un estabilizador de suelo, como material impermeable, al nivel de desplante de un relleno sanitario”

Índice

Contenido	Página
Resumen	7
Abstract	8
Índice de cuadros y figuras	9
Introducción	10
Justificación	11
Planteamiento del problema	12
Hipótesis	12
Objetivo general	12
Objetivos específicos	12
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	
I.1 Problemática asociada a una inadecuada disposición final de residuos sólidos municipales.	14
I.2 Definición y características de un relleno sanitario.	16
I.3 Legislación ambiental para el diseño de un relleno sanitario.	25
I.4 Factores que influyen en la producción de lixiviados, volúmenes de generación y características físicas, químicas y biológicas.	33
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	
II.1 Definición y funcionamiento de un estabilizador de suelo aplicado como material impermeable al nivel de desplante de un relleno sanitario.	44
II.2 Análisis del estabilizador y posibles reacciones con los lixiviados.	52
II.3 Pruebas de laboratorio para determinar la resistencia y permeabilidad del material mejorado con el estabilizador.	54
II.4 Eficiencia del terreno mejorado para la retención de lixiviados.	69



CAPÍTULO III. RESULTADOS

III.1 Características de resistencia y permeabilidad del suelo mejorado con un estabilizador.	78
III.2 Reacciones del estabilizador con los componentes químicos de los lixiviados.	87
III.3 Eficiencia del suelo mejorado en la retención de los lixiviados.	91
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
BIBLIOGRAFÍA	96
GLOSARIO	100
ANEXOS	102



Resumen

Los momentos que vive nuestro país requieren el impulso de nuevas tecnologías que permitan la creación y desarrollo de una infraestructura sólida y durable que proteja y cuide el medio ambiente. El escaso interés de muchas personas al cuidado de los ecosistemas, nos motiva a ser partícipes y sumarnos en un esfuerzo conjunto con las autoridades correspondientes para impulsar medidas importantes al cuidado del medio ambiente. Ante este panorama, los sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos son un área de oportunidad para desarrollar proyectos que apliquen la tecnología y aprovechen al máximo los recursos que de éste puedan ser obtenidos.

La contaminación que se genera en estos sitios de disposición de residuos es un problema mundial también presente en nuestro país. Este tipo de contaminación afecta principalmente a los mantos acuíferos a causa de la transminación de residuos; así como, los asentamientos y deformaciones que llegan a presentarse en los rellenos sanitarios, provocando con esto que se reduzca el tiempo de vida proyectado para el sitio. En México, la aplicación de un estabilizador de suelo de nueva generación -de nombre comercial *Base Seal*-, ha permitido la reducción de los tiempos de ejecución y la mejora de las características del suelo, el cual no ha sido aplicado al día de hoy en obras de ingeniería ambiental para el control de la migración de lixiviados hacia el subsuelo.

El estabilizador *Base Seal* es un producto ecológico que se emplea en la construcción y mantenimiento de carreteras, aeropuertos, depósitos artificiales de agua, caminos de terracería, entre otros. Este producto es un polímero enzima que cohesiona los espacios entre partículas transformando las características del suelo al incrementar su grado de impermeabilidad, compactación y resistencia, con lo que supera los estándares establecidos por las normas de construcción en nuestro país.

Es así que el presente trabajo muestra la aplicación de un estabilizador de suelo como material impermeable en un relleno sanitario, el cual se aplica al nivel de desplante del primer cuerpo de residuos sólidos, para obtener con esto un comportamiento aceptable en el terreno, alta resistencia, incremento en la impermeabilidad, reducción en los asentamientos y, por consiguiente, la disminución considerable de la contaminación de los mantos acuíferos. Los ensayos realizados en el laboratorio dieron resultados positivos al aplicar el estabilizador en las tres muestras; se obtuvo mayor resistencia al soporte, mejoraron las propiedades físicas del suelo; y, para el caso de la muestra compactada y con flujo de lixiviado, el coeficiente de permeabilidad se redujo considerablemente.

Se afirma la hipótesis la cual dice que mediante la aplicación de un estabilizador de suelo, al nivel de desplante de un relleno sanitario, se puede evitar asentamientos y deformaciones del terreno y la filtración hacia el subsuelo y acuíferos de los lixiviados generados en un relleno sanitario.



Abstract

The moments in our country require the promotion of new technologies that enable the creation and development of a solid infrastructure and durable to protect and care for the environment. The lack of interest of many people in the care of ecosystems, we are motivated to be involved and join in a joint effort with the relevant authorities to promote measures important to the care of the environment. Against this background, the final disposal sites of urban solid waste is an area of opportunity for development and apply technology to maximize the resources that it can be obtained.

The pollution that is generated in these waste disposal sites is a global problem also present in our country. This type of pollution primarily affects the aquifers due to transminación waste as well as the settlements and deformations that can occur in landfills, provoking it to reduce the projected lifetime for the deposit. In Mexico, the application of a soil stabilizer for new generation - Base Seal brand name - has allowed the reduction of execution times and improved soil characteristics, which has not been held to date in engineering works to control the migration of leachate into the ground.

Base Seal stabilizer is an organic product that is used in the construction and maintenance of roads, airports, artificial water reservoirs, gravel roads, among others. This enzyme product is a polymer that holds transforming the spaces between particles of soil characteristics to increase their degree of water resistance, compaction resistance, thus exceeding the standards set by the rules of construction in our country.

The thesis shows the application of a soil stabilizer waterproof material in a landfill, which is used at the level of rudeness in the first body of solid waste for acceptable behavior in this field, high strength, increased impermeability, reduced settlement and, therefore, considerable reduction of pollution of aquifers. The laboratory tests gave positive results in implementing the stabilizer in the three samples was obtained to support greater strength, improved soil physical properties and, in the case of the compacted specimen and flow of leachate, the ratio of permeability was significantly reduced.

It affirms the hypothesis which says that by applying a soil stabilizer, the level of rudeness from a landfill, you can avoid settlements and deformations of the ground and seep into groundwater and aquifers of the leachate in a landfill.



Índice de cuadros y figuras

Figura 1. Generación de residuos sólidos municipales por región en México	Página 14
Figura 1.1 Evolución de la generación de los RSM por regiones en México	Página 15
Figura 2. Relleno sanitario operado con equipo pesado	Página 17
Figura 3. Tractor agrícola adaptado para las operaciones del relleno sanitario	Página 18
Figura 4. Remolque enganchado a un tractor agrícola para la recolección de residuos sólidos	Página 18
Figura 5. Método de trinchera para construir un relleno sanitario	Página 19
Figura 6. Método de área para construir un relleno sanitario	Página 20
Figura 7. Método de área para rellenar depresiones	Página 20
Figura 8. Combinación de ambos métodos para construir un relleno sanitario	Página 21
Figura 9. Funcionamiento de un relleno sanitario	Página 24
Figura 10. Generación de lixiviados en relleno sanitario	Página 38
Figura 11. Esquema simplificado del ciclo hidrológico	Página 70
Figura 12. Ascensión capilar de agua en el suelo	Página 72
Figura 13. Permeámetro de carga constante	Página 74
Figura 14. Permeámetro de carga variable	Página 75
Cuadro 1. Ventajas y limitaciones del relleno sanitario	Página 22
Cuadro 2. Caracterización de lixiviado crudo, clarificado y clarificado – filtrado	Página 36
Cuadro 3. Composición química de los lixiviados	Página 39
Cuadro 4. Características físico – químicas de los lixiviados de rellenos sanitarios en México	Página 40
Cuadro 5. Bacterias específicas identificadas en el lixiviado	Página 41
Cuadro 6. Variación de los parámetros de lixiviación	Página 42
Cuadro 7. Construcción de carretera con tecnología del polímero Base Seal comparada con los métodos convencionales	Página 50
Cuadro 8. Grupo AASHTO	Página 51
Cuadro 9. Conductividad hidráulica para diversos suelos	Página 73
Cuadro 10. Clasificación del grado de permeabilidad del suelo	Página 73
Cuadro 11. Características fisicoquímicas del lixiviado ensayado con el estabilizador	Página 87



Introducción

El aumento de la población, una mala educación ambiental y la inconsciencia de muchos seres humanos ha generado que hoy en día el medio ambiente presente daños irreversibles que van en aumento y el panorama es gris y complicado.

Contrariamente a lo que ocurre en la naturaleza, en la cual no se generan residuos sólidos, se busca hoy en día que los desechos de un proceso se aprovechen en otro, la especie humana ha desarrollado actividades y procesos productivos que consumen grandes cantidades de energía y agua produciendo enormes volúmenes de residuos, los cuales representan un grave problema para la humanidad en vista de que su inadecuado manejo puede ocasionar serios problemas de contaminación tanto del aire, agua y suelo, al mismo tiempo generando enfermedades.

En México se necesita implementar acciones domésticas, escolares, industriales y civiles a fin de disminuir los problemas de salud provocados por la contaminación ambiental, como la que provoca la descomposición de los residuos sólidos. La disposición de los residuos sólidos a cielo abierto ha sido prohibida, el método de tratamiento que actualmente se emplea en México y en otros países es el relleno sanitario.

Los residuos, por mencionar solo alguno de los diversos problemas que enfrentamos actualmente, se ha convertido en uno de los temas emergentes a tratar de inmediato. La Construcción y operación adecuada de un relleno sanitario es la clave para el adecuado control de los grandes volúmenes de residuos que se generan al día en nuestro país, muy particularmente en nuestra Ciudad.

El crecimiento de los residuos, así como su manejo inadecuado, están creando presiones adicionales para el logro de los objetivos por los cuales fueron creadas las áreas naturales protegidas. El conjunto de problemas que genera los residuos ha sido favorecido por la falta de coordinación entre las autoridades, así como la falta de participación de las comunidades generadoras. Es urgente instrumentar programas estratégicos que atiendan de manera integral la problemática, que como sabemos, están generando consecuencias y efectos no solo en la naturaleza sino también en las actividades y salud humana.

Como primer paso abordaremos el tema de la construcción de un relleno sanitario como la base fundamental para un buen desarrollo y aprovechamiento de los recursos que se pueden obtener de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), y para ello se debe construir un sitio de disposición final adecuado, proyectado a un tiempo de vida útil y contar con una estructura resistente, sin asentamientos y con un bajo coeficiente de permeabilidad como lo establece la Norma, para evitar la migración de los lixiviados hacia los mantos acuíferos.

Por otro lado, las consecuencias ambientales que genera la disposición de los residuos sólidos sobre la superficie, no eran consideradas como trascendentales desde hace treinta años en la mayoría de los países del mundo. Debido al impacto contaminante de los lixiviados y los gases generados por estas estructuras, los gobiernos y comunidad científica, han desarrollado una serie de políticas y tecnologías, que permiten tener una mejor regulación en las prácticas de disposición de residuos. El manejo inadecuado de los residuos, la gran heterogeneidad de los residuos y del sitio en donde se han dispuesto, trae como consecuencia la generación de productos altamente contaminantes.

La calidad y cantidad de la producción del lixiviado, depende de las interacciones que se presenten en el medio ambiente, los residuos, el suelo y el agua subterránea. Investigaciones en campo, laboratorio y modelación, han proporcionado grandes avances en la percepción del impacto que tienen los rellenos sanitarios en la calidad del agua subterránea. Sin embargo, aunque un gran número de rellenos se diseñaron respetando las políticas ambientales, tienen un riesgo potencial de descarga contaminante.



Justificación

El suelo es uno de los principales recursos indispensables para los seres vivos y para los humanos, por lo que es de suma importancia empezar a combatir los distintos problemas que se han generado con el paso de los años, y que en la actualidad amenazan seriamente a la humanidad.

El inicio a la solución de un problema importante en los sitios de disposición final, y sobre todo, la protección de los mantos acuíferos, es un tema que debe interesar a todos los habitantes y a su vez, seguir los pasos de los países que ya están tomando las medidas necesarias para tratar de salvar al planeta.

En el medio rural, nunca fue un verdadero problema, pues los residuos orgánicos seguían el ciclo de la vida sirviendo de abono o de alimento para animales, los vertidos arrojados a los ríos eran depurados por las propias aguas, el gran poder depurador de la naturaleza todavía no había sido derrotado por el ansia de poder del hombre.

En las ciudades donde la población se ha incrementado de manera potencial, los residuos han sido un problema casi desde el origen de éstas, debido a la alta densidad de población y al hecho de arrojar los residuos a las calles, el no separar los residuos como su clasificación lo amerita y sobre todo no contar con un adecuado control de ello, ha producido la proliferación de insectos, roedores y microorganismos patógenos, trayendo como consecuencia enfermedades catastróficas para el hombre como la peste. Un mal sistema de gestión de los residuos sólidos, producirá un deterioro y depreciación del entorno debido a la contaminación del aire, del agua y del suelo.

Sumando a la lista de los problemas que se derivan de la mala disposición de los Residuos Sólidos Municipales, tenemos que los residuos dispuestos en los rellenos sanitarios generan los llamados líquidos percolados o lixiviados, que contienen una elevada carga orgánica capaz de consumir el oxígeno de cursos en agua.

Los residuos dispuestos en rellenos sanitarios sufren naturalmente un proceso de degradación anaeróbica, del cual resultan subproductos intermedios sólidos, productos gaseosos (como metano y dióxido de carbono) y líquidos percolados (*lixiviados*). Estas consecuencias, presentes en todos los sistemas de relleno sanitario del planeta, son objeto de atención por parte de los responsables de la disposición final de los desechos.

En el caso de los lixiviados, se deben prevenir sus posibles efectos nocivos. Las prevenciones incluyen desde el control durante la operación de los rellenos y los monitoreos periódicos una vez terminados, hasta la experimentación de distintos sistemas físico - químicos para eliminar su peligrosidad.

Como son producto de la degradación de los residuos y su interacción con el agua aportada por las lluvias, los lixiviados presentan una composición química variable que en general depende de las características de los residuos dispuestos. Los residuos domésticos que se extraen generan percolados de color oscuro, olor desagradable, cuyas características físico-químicas dependen de su antigüedad pero comúnmente muestran una elevada carga orgánica y altos valores de alcalinidad y salinidad. Es precisamente la carga orgánica la que, llegado el caso, puede producir efectos nocivos para el medio ambiente.

Para abatir este problema se debe atacar desde el fondo, o desde el inicio como es el caso del nivel de desplante de un relleno sanitario; el proceso constructivo para la impermeabilización del primer cuerpo de los residuos sólidos es la clave para el buen funcionamiento del sitio y con ello obtener que estos líquidos antes mencionados lleguen a contaminar el subsuelo.

En la actualidad en nuestro país los sistemas tradicionales de impermeabilización de los desplantes de rellenos sanitarios, consideran el empleo de geomembranas sintéticas que demandan altos costos de inversión para las obras de terracería, para la preparación del terreno y para la adquisición e instalación de estas geomembranas, que



en la mayoría de los casos son un impedimento para que muchos municipios realicen esta obra de ingeniería, con sus efectos adversos al ambiente. Adicionalmente a esto, los asentamientos diferenciales del terreno por la carga de residuos pueden ocasionar fracturas, tanto en el suelo como en la geomembrana y con ello propicien la migración del lixiviado hacia las aguas subterráneas.

Por estas razones, en este trabajo se propone la utilización de un estabilizador de suelos que subsane todos estos inconvenientes de las geomembranas sintéticas, al proporcionar características adecuadas de resistencia e impermeabilidad al suelo que se utilice para desplantar un relleno sanitario obteniendo ventajas económicas y a la vez ambientales.

Planteamiento del problema.

En nuestro país, el método generalizado para la disposición final de los 36,193 millones de toneladas de residuos sólidos municipales producidos por año, es mediante rellenos sanitarios y tiraderos a cielo abierto con escasos controles ambientales, sobre todo para evitar la migración del biogás y lixiviados, lo cual impacta negativamente al ambiente y a la salud de la población. Un buen sistema de impermeabilización de la superficie del terreno en contacto con los residuos, no solo impedirá la filtración del lixiviado hacia los mantos acuíferos, sino también reducirá la migración del biogás hacia el ambiente evitando así afectaciones a la población y generando las condiciones propicias para su aprovechamiento.

Una mala educación ambiental, una infraestructura limitada para la disposición y el crecimiento potencial de la población y con ello los RSU, son las principales causas de tener hoy en México un grave problema de manejo de estos RSU.

Por lo anterior, se requieren efectuar trabajos emergentes para incentivar la creación de proyectos de construcción de rellenos sanitarios, que cumplan adecuadamente con su vida útil y que a la vez sean aprovechados todos los recursos que se generan en el sitio, obteniendo beneficios ambientales, económicos y energéticos.

Hipótesis

Mediante la aplicación de un estabilizador de suelo, al nivel de desplante de un relleno sanitario, se puede evitar asentamientos y deformaciones del terreno y la filtración hacia el subsuelo y acuíferos de los lixiviados generados en un relleno sanitario.

Objetivo General

Garantizar un suelo resistente e impermeable al nivel de desplante del primer cuerpo de residuos sólidos de un relleno sanitario, empleando un estabilizador de suelo (*Base – Seal*), proporcionando un funcionamiento adecuado del sitio.

Objetivos Específicos

- ✓ Mejorar el suelo disponible para la Construcción de un sitio de disposición final (relleno sanitario), aún teniendo características geológicas e hidrogeológicas inadecuadas.
- ✓ Obtener la máxima impermeabilidad en la capa del nivel de desplante del primer cuerpo de residuos sólidos de un relleno sanitario, empleando un estabilizador de suelo, el cual proporcione una capa resistente que evite asentamientos o deformaciones en el futuro y garantice su vida útil.
- ✓ Evitar la filtración hacia el subsuelo y la capilaridad hacia el suelo, en la base de un relleno sanitario, logrando proteger al subsuelo de agentes contaminantes; éste con un procedimiento constructivo adecuado y aplicando un estabilizador de suelos en el nivel de desplante.



CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

I.1 Problemática asociada a una inadecuada disposición final de residuos sólidos municipales.

Como resultado de las diferentes actividades productivas que desarrollan las sociedades, se generan una serie de desechos sólidos, líquidos o gaseosos que pueden tener efectos negativos sobre el ambiente y la salud humana. Ejemplo de ellos son los residuos sólidos municipales (RSM). Éstos son generados en las casas habitación y provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos como residuos de otra índole. En los últimos años, la generación total de RSM se incrementó, alcanzando 34.6 millones de toneladas en el año 2004. Los RSM se producen mayormente en la región Centro (50%), siguiéndole la región Norte (18%) y el Distrito Federal (13%). Durante el periodo 1997-2004, la zona Centro, la Frontera Norte y la zona Sur incrementaron de manera significativa su generación de residuos (24, 35 y 17% respectivamente), destacando la zona Centro que alcanzó una generación de 17 millones de toneladas de RSM en 2004¹.

De acuerdo a lo anterior, se observa la magnitud del problema, por lo que se hace indispensable el tratamiento adecuado de los residuos, dentro de un contexto económico, social y ambiental óptimo.

Para la eliminación de los residuos sólidos, el relleno sanitario ha sido la opción más empleada, la menos costosa y la más fácil. En otros tiempos, los residuos eran simplemente arrojados en barrancas o espacios abiertos para luego ser olvidados y generarse así un problema incontrolable.

Estos residuos depositados indiscriminadamente generan contaminación ambiental, desde malos olores, explosiones, contaminación de los mantos acuíferos, residuos arrastrados por el viento, hasta proliferación de fauna nociva, etc. En la actualidad se busca que los residuos generados sean dispuestos adecuadamente en tiraderos controlados o en rellenos sanitarios. En la figura 1 se muestra la generación de los residuos sólidos municipales por región en México y en la gráfica 1 se muestra como ha sido la evolución de los residuos sólidos municipales en México.



Figura 1. Generación de residuos sólidos municipales por región en México (INEGI, 2004)

¹ Fuentes: http://genc.iie.org.mx/genc/eolica/libroo/c3web/3_4.htm
<http://www2.ine.gob.mx/>

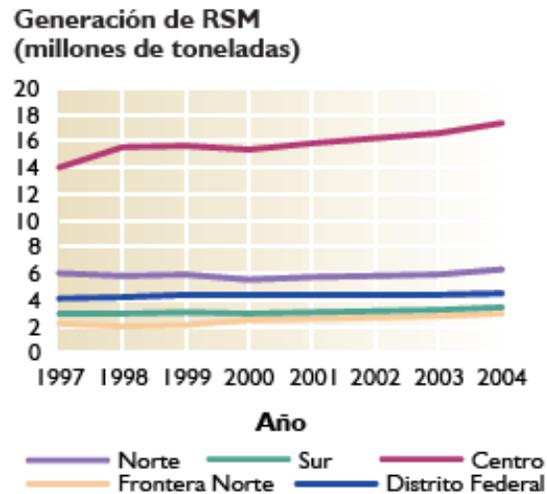


Figura 1.1. Evolución de la generación de los RSM por regiones en México (INEGI 2004)

A pesar de que la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos define claramente los residuos sólidos urbanos, en este apartado se hará referencia a los residuos sólidos municipales, debido a que la información con que se cuenta fue generada con base en la Norma Mexicana NMX-AA-61-1985, que establece el método para la determinación de la generación de residuos sólidos municipales².

Las consecuencias ambientales que genera la disposición de los residuos sólidos sobre la superficie, no eran consideradas como trascendentales desde hace treinta años en la mayoría de los países del mundo. Debido al impacto contaminante de los líquidos percolados (lixiviados) y los gases generados por estas estructuras, los gobiernos y comunidad científica, han desarrollado una serie de políticas y tecnologías, que permiten tener una mejor regulación en las prácticas de disposición de residuos. El manejo inadecuado de los residuos sólidos, la gran heterogeneidad de los residuos y del sitio en donde se han dispuesto, trae como consecuencia la generación de productos altamente contaminantes. La calidad y cantidad de la producción del lixiviado, depende de las interacciones que se presenten en el medio ambiente, los residuos, el suelo y el agua subterránea. Investigaciones en campo, laboratorio y modelación, han proporcionado grandes avances en la percepción del impacto que tienen los rellenos sanitarios en la calidad del agua subterránea. Sin embargo, aunque un gran número de rellenos se diseñaron respetando las políticas ambientales, tienen un riesgo potencial de descarga contaminante.

Por otro lado, la fracción orgánica contenida en los residuos dispuestos en los rellenos sanitarios, es degradada por microorganismos anaerobios resultando, como productos principales, gases como el metano y bióxido de carbono (biogás). El biogás no colectado es un peligro latente, ya que pueden ocurrir explosiones o generar riesgos de intoxicación, dependiendo del grado de exposición, además representa una aportación muy significativa al efecto invernadero³.

En los años 70's, se encontraron algunas soluciones eficaces para recuperar el biogás con el fin de minimizar las consecuencias ambientales de los sitios de disposición final, al mismo tiempo que se tomaba conciencia de su importancia como potencial energético⁴. En efecto, al ser inevitable la producción de gases de la descomposición anaerobia de los RSM, fue necesario recuperarlos y disponerlos, o mejor aprovecharlos.

² SEDESOL. *Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas*. México. 2005. SEMARNAT. *Estadísticas del Medio Ambiente*. México. 1997.

³ VIDALES ALBARRAN H. *Generación y cuantificación de biogás en rellenos sanitarios*. Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos Peligrosos A.C., México, Septiembre-Octubre 1994, Tomo 1 Vol. 8

⁴ SEDUE. "Manual de relleno sanitario", 1993



1.2 Definición y características de un relleno sanitario.

¿Qué es un tiradero de basura a cielo abierto o basurero?

El tiradero de basura es una de las prácticas de disposición final más antiguas que ha utilizado el hombre para tratar de deshacerse de los residuos que él mismo produce en sus diversas actividades. Se le llama *tiradero* al sitio donde los residuos sólidos se abandonan sin separación ni tratamiento alguno. Este lugar suele funcionar sin criterios técnicos en una zona de recarga situada junto a un cuerpo de agua, un drenaje natural, etc. Allí no existe ningún tipo de control sanitario ni se impide la contaminación del ambiente; el aire, el agua y el suelo son deteriorados por la formación de gases y líquidos lixiviados, quemas y humos, polvo y olores nauseabundos.

Los tiraderos de residuos sólidos a cielo abierto son cuna y hábitat de fauna nociva transmisora de múltiples enfermedades. En ellos se observa la presencia de perros, vacas, cerdos y otros animales que representan un peligro para la salud y la seguridad de los pobladores de la zona, especialmente para las familias de los segregadores que sobreviven en condiciones infrahumanas sobre los montones de residuos sólidos o en sus alrededores.

La segregación de subproductos de los residuos sólidos promueve la proliferación de negocios relacionados con la reventa de materiales y el comercio ilegal. Ello ocasiona la depreciación de las áreas y construcciones colindantes; asimismo, genera suciedad, incremento de contaminantes atmosféricos y falta de seguridad por el tipo de personas que concurren a estos sitios.

En la actualidad, el hecho de que los municipios abandonen sus residuos sólidos en tiraderos a cielo abierto es considerado una práctica irresponsable para las generaciones presentes y futuras, así como opuesta al desarrollo sustentable.

¿Qué es un relleno sanitario?

El relleno sanitario es una técnica de disposición final de los residuos sólidos en el suelo que no causa molestia ni peligro para la salud o la seguridad pública; tampoco perjudica el ambiente durante su operación ni después de su clausura. Esta técnica utiliza principios de ingeniería para confinar los residuos sólidos en un área lo más estrecha posible, cubriéndola con capas de tierra diariamente y compactándola para reducir su volumen. Además, prevé los problemas que puedan causar los líquidos y gases producidos por efecto de la descomposición de la materia orgánica.

Hace poco menos de un siglo en Estados Unidos, surgió el relleno sanitario como resultado de las experiencias de compactación y cobertura de los residuos con equipo pesado; desde entonces, se emplea este término para aludir al sitio en el cual los residuos son primero depositados y luego cubiertos al final de cada día de operación.

En la actualidad, el relleno sanitario moderno se refiere a una instalación diseñada y operada como una obra de saneamiento básico, que cuenta con elementos de control lo suficientemente seguros y cuyo éxito radica en la adecuada selección del sitio, en su diseño y, por supuesto, en su óptima operación y control.

Definición de Relleno Sanitario⁵.

SEDESOL/SECOFI

⁵ López Sánchez Felipe, Bleicher Sarmiento Conrado, Aprovechamiento de Sitios de Disposición Final de Residuos Sólidos Municipales para la Generación de Energía Eléctrica, Primer Congreso Nacional de la Asociación Mexicana para la Economía Energética A.C.. Primera edición, México, D.F. 1995, ISBN 968-36-5444-4 pág. 359

“Relleno sanitario, es una obra de ingeniería planeada y ejecutada, previendo los efectos al ambiente para la disposición final de los residuos sólidos municipales”.

AMERICAN SOCIETY CIVIL ENGINEERING (U.S.A.S.C.E).

“Relleno sanitario, es una técnica para la disposición de los residuos sólidos en el suelo sin causar perjuicios al medio ambiente y sin causar molestias o peligro para la salud y seguridad pública; esta técnica utiliza principios de ingeniería para confinar los residuos, en la menor área posible, reduciendo su volumen al mínimo practicable y cubriendo los residuos así depositados con una capa de tierra con la frecuencia necesaria”.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (U.S.E.P.A).

“Relleno sanitario es un método de ingeniería para la disposición de residuos sólidos en el suelo, de manera que le dé protección al ambiente, mediante el esparcido de los residuos en pequeñas capas, compactándolos al menor volumen práctico y cubriéndolos con tierra al final del día de trabajo”.

Tipos de relleno sanitario

Se podría proponer tres tipos de rellenos sanitarios, a saber:

I. Relleno sanitario mecanizado

El relleno sanitario mecanizado es aquel diseñado para las grandes ciudades y poblaciones que generan más de 40 toneladas diarias. Por sus exigencias es un proyecto de ingeniería bastante complejo, que va más allá de operar con equipo pesado. Esto último está relacionado con la cantidad y el tipo de residuos, la planificación, la selección del sitio, la extensión del terreno, el diseño y la ejecución del relleno, y la infraestructura requerida, tanto para recibir los residuos como para el control de las operaciones, el monto y manejo de las inversiones y los gastos de operación y mantenimiento.

Para operar este tipo de relleno sanitario se requiere del uso de un compactador de residuos sólidos, así como equipo especializado para el movimiento de tierra: tractor de oruga, retroexcavadora, cargador, volquete, etc., como se muestra en la figura 2.



Figura 2. Relleno sanitario operado con equipo pesado⁶

II. Relleno sanitario semi-mecanizado

Cuando la población genere o tenga que disponer entre 16 y 40 toneladas diarias de RSM en el relleno sanitario, es conveniente usar maquinaria pesada como apoyo al trabajo manual, a fin de hacer una buena compactación de los residuos sólidos, estabilizar los terraplenes y dar mayor vida útil al relleno.

⁶ Brunner D.H., 1992.

En estos casos, el tractor agrícola adaptado con una hoja topadora o cuchilla y con un cucharón o rodillo para la compactación puede ser un equipo apropiado para operar este relleno al que podríamos llamar *semi mecanizado* (como se muestra en la figura 3).



Figura 3. Tractor agrícola adaptado para las operaciones del relleno sanitario⁷

En México, después de 18 meses de estudios, pruebas y experimentos, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología estableció: "Adaptando un tractor de 31 HP, en 8 horas de trabajo y con un peón de ayuda, pueden confinar sanitariamente los residuos de poblaciones de hasta 80.000 habitantes, o sea, aproximadamente 40 t/día de residuos sólidos".

Con base en experiencias previas, se puede afirmar que es necesario el empleo de equipos de movimiento de tierras (tractores de orugas o retroexcavadoras) en forma permanente cuando al relleno sanitario se llevan más de 40 t/día de RSM. En la región, esto equivale por lo general a poblaciones mayores de 40.000 habitantes.

Por su versatilidad, el tractor agrícola puede servir para prestar o apoyar el servicio de recolección de residuos sólidos si de preferencia se le engancha un remolque con volteo hidráulico de unos 6 a 8 metros cúbicos de capacidad o bien una caja compactadora, dependiendo de las necesidades y recursos de la localidad (ver figura 4).



Figura 4. Remolque enganchado a un tractor agrícola para la recolección de residuos sólidos⁸

Ocasionalmente, este mismo equipo podrá emplearse en la realización de algunas obras públicas en el municipio, con lo que se aprovecharía al máximo la inversión realizada.

⁷ Brunner D.H., 1992.

⁸ Brunner D.H., 1992.

III. Relleno sanitario manual

Es una adaptación del concepto de relleno sanitario para las pequeñas poblaciones que por la cantidad y el tipo de residuos que producen menos de 15 t/día, además de sus condiciones económicas, no están en capacidad de adquirir el equipo pesado debido a sus altos costos de operación y mantenimiento⁹.

El término *manual* se refiere a que la operación de compactación y confinamiento de los residuos puede ser ejecutado con el apoyo de una cuadrilla de hombres y el empleo de algunas herramientas.

Métodos de relleno sanitario

A) Método de trinchera o zanja

Este método se utiliza en regiones planas y consiste en excavar periódicamente zanjas de dos o tres metros de profundidad con una retroexcavadora o un tractor de orugas. Hay experiencias de excavación de trincheras de hasta de 7 metros de profundidad. Los RSM se depositan y acomodan dentro de la trinchera para luego compactarlos y cubrirlos con la tierra excavada. Se debe tener especial cuidado en periodos de lluvias dado que las aguas pueden inundar las zanjas. De ahí que se deba construir canales perimétricos para captarlas y desviarlas e incluso proveer a las zanjas de drenajes internos. En casos extremos, se puede construir un techo sobre ellas o bien bombear el agua acumulada. Sus taludes o paredes deben estar cortados de acuerdo con el ángulo de reposo del suelo excavado (ver figura 5).

La excavación de zanjas exige condiciones favorables tanto en lo que respecta a la profundidad del nivel freático como al tipo de suelo. Los terrenos con nivel freático alto o muy próximo a la superficie no son apropiados por el riesgo de contaminar el acuífero. Los terrenos rocosos tampoco lo son debido a las dificultades de excavación.

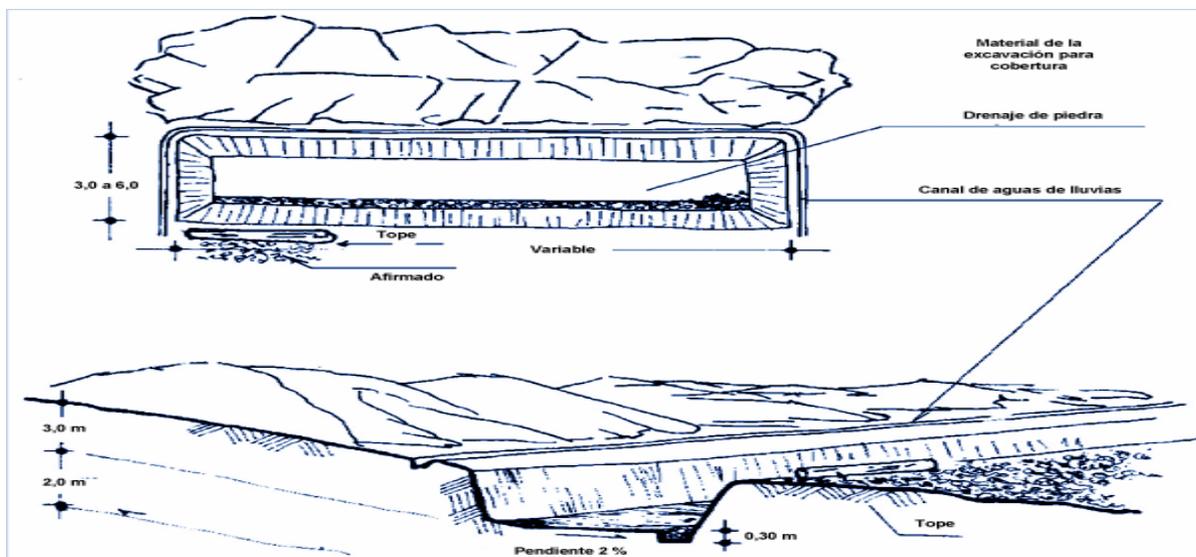


Figura 5. Método de trinchera para construir un relleno sanitario¹⁰

⁹ Jaramillo Jorge, et al., 1999.

¹⁰ Brunner D.H., 1992.

B) Método de área

En áreas relativamente planas, donde no sea factible excavar fosas o trincheras para enterrar los residuos sólidos, ésta puede depositarse directamente sobre el suelo original, el que debe elevarse algunos metros, previa impermeabilización del terreno (ver figura 6). En estos casos, el material de cobertura deberá ser transportado desde otros sitios o, de ser posible, extraído de la capa superficial. Las fosas se construyen con una pendiente suave en el talud para evitar deslizamientos y lograr una mayor estabilidad a medida que se eleva el relleno.

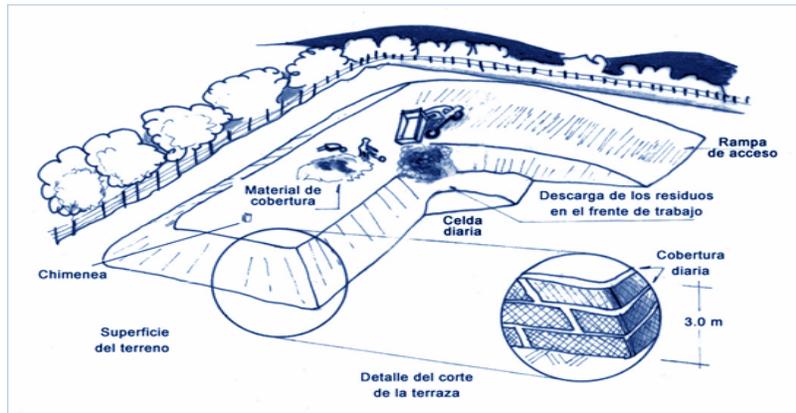


Figura 6. Método de área para construir un relleno sanitario¹¹

Sirve también para rellenar depresiones naturales o canteras abandonadas de algunos metros de profundidad como se muestra en la figura 7. El material de cobertura se excava de las laderas del terreno o, en su defecto, de un lugar cercano para evitar los costos de acarreo. La operación de descarga y construcción de las celdas debe iniciarse desde el fondo hacia arriba.

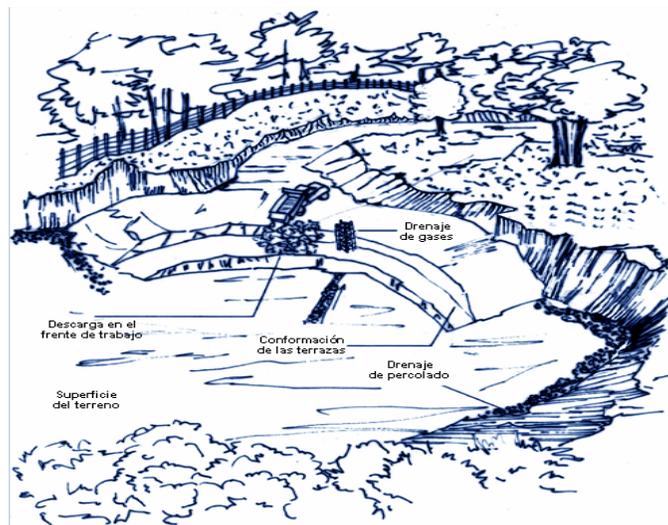


Figura 7. Método de área para rellenar depresiones¹²

¹¹ Brunner D.H., 1992.

¹² Brunner D.H., 1992.

El relleno se construye apoyando las celdas en la pendiente natural del terreno; es decir, los residuos sólidos se descargan en la base del talud, se extiende y apisona contra él y se recubre diariamente con una capa de tierra. Se continúa la operación avanzando sobre el terreno, conservando una pendiente suave de unos 18.4 a 26.5 grados en el talud; es decir, la relación vertical/horizontal de 1:3 a 1:2, respectivamente, y en la superficie pendientes de 2 a 3.5%.

C) Combinación de ambos métodos

Dado que estos dos métodos de construcción de rellenos sanitarios tienen técnicas similares de operación, es posible combinar ambos para aprovechar mejor el terreno y el material de cobertura, así como para obtener mejores resultados (figura 8).

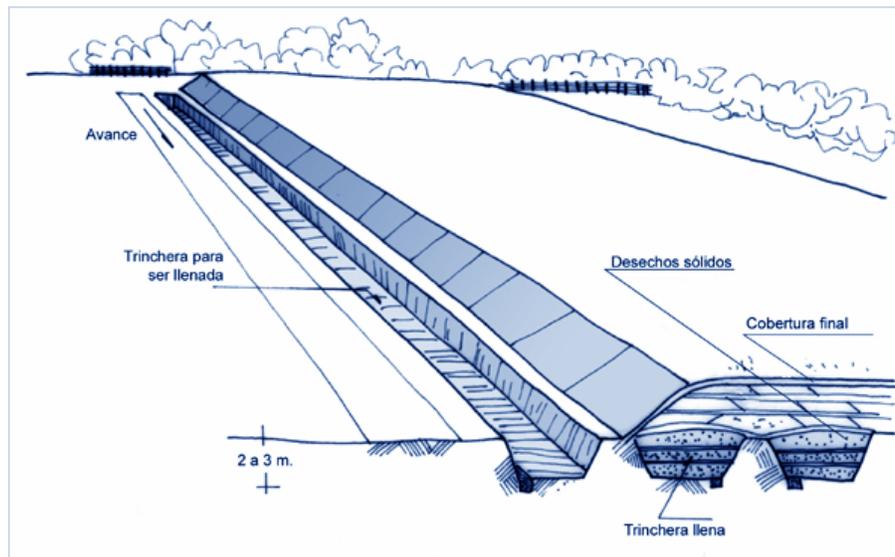


Figura 8. Combinación de ambos métodos para construir un relleno sanitario¹³

Toda ciudad o pequeña localidad debe contar con un relleno sanitario propio o de un municipio cercano para disponer sus RSM. De lo contrario, se seguirá favoreciendo la práctica irresponsable del tiradero a cielo abierto en su territorio.

Las principales ventajas y desventajas de un relleno sanitario se describen en el siguiente cuadro número 1:

¹³ Brunner D.H., 1992.

Cuadro No. 1. Ventajas y desventajas de un relleno sanitario¹⁴

Ventajas	Limitaciones
1. La inversión inicial de capital es inferior a la que se necesita para instaurar el tratamiento de residuos mediante plantas de incineración o de compost.	1. La adquisición del terreno es difícil debido a la oposición de los vecinos al sitio seleccionado, fenómeno conocido como NIMBY (<i>not in my back yard</i> “no en mi patio trasero”), por diversas razones: <ul style="list-style-type: none"> • la falta de conocimiento sobre la técnica del relleno sanitario. • se asocia el término <i>relleno sanitario</i> al de botadero a cielo abierto. • la evidente desconfianza mostrada hacia las administraciones locales que no garantizan la calidad ni sostenibilidad de la obra. • la falta de saneamiento legal del lugar.
2. Tiene menores costos de operación y mantenimiento que los métodos de tratamiento.	2. El rápido proceso de urbanización, que limita y encarece el costo de los pocos terrenos disponibles, lo que obliga a ubicar el relleno sanitario en sitios alejados de la población.
3. Un relleno sanitario es un método completo y definitivo, dada su capacidad para recibir todo tipo de RSM.	3. La vulnerabilidad de la calidad de las operaciones del relleno y el alto riesgo de transformarlo en un botadero a cielo abierto, principalmente por la falta de voluntad política de las administraciones municipales para invertir los fondos necesarios a fin de asegurar su correcta operación y mantenimiento.
4. Genera empleo de mano de obra poco calificada, disponible en abundancia en los países en desarrollo.	4. No se recomienda el uso del relleno clausurado para construir viviendas, escuelas, etc.
5. Recupera gas metano en los rellenos sanitarios que reciben más de 500 t/día, lo que puede constituir una fuente alternativa de energía para algunas ciudades.	5. La limitación para construir infraestructura pesada por los asentamientos y hundimientos después de clausurado el relleno.
6. Su lugar de emplazamiento puede estar tan cerca del área urbana como lo permita la existencia de lugares disponibles, lo que reduce los costos de transporte y facilita la supervisión por parte de la comunidad.	6. Se requiere un monitoreo luego de la clausura del relleno sanitario, no solo para controlar los impactos ambientales negativos, sino también para evitar que la población use el sitio indebidamente.
7. Permite recuperar terrenos que se consideraban improductivos o marginales, tornándolos útiles para la construcción de parques, áreas recreativas y verdes, etc.	7. Puede ocasionar impacto ambiental de largo plazo si no se toman las previsiones necesarias en la selección del sitio y no se ejercen los controles para mitigarlos. En rellenos sanitarios de gran tamaño conviene analizar los efectos del tráfico vehicular, sobre todo de los camiones que transportan los residuos por las vías que confluyen al sitio y que producen polvo, ruido y material volante. En el vecindario el impacto lo generan los líquidos, gases y malos olores que pueden emanar del relleno.
8. Un relleno sanitario puede comenzar a funcionar en corto tiempo como método de eliminación de residuos.	8. Los predios o terrenos situados alrededor del relleno sanitario pueden devaluarse.
9. Se considera flexible porque puede recibir mayores cantidades adicionales de residuos con poco incremento de personal.	9. En general, no puede recibir residuos peligrosos.

El uso del relleno sanitario una vez clausurado, depende del clima, de su localización respecto al área urbana, de su distancia de las zonas habitadas, de su extensión o área superficial y de las características constructivas. Estas últimas tienen que ver con la configuración final del relleno, la altura y el grado de compactación y, por supuesto, la capacidad económica de la población.

El terreno de un relleno sanitario clausurado se presta para desarrollar programas de recuperación paisajística y social como un parque, un campo deportivo o una zona verde. Por fortuna ya existen en la Región experiencias de aprovechamiento de estos sitios transformados en parques y áreas recreativas en México, D. F., Santiago de Chile y Buenos Aires, entre otras.

¹⁴ <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/curso/relleno/capitulo2.html>



No se recomienda la construcción de edificaciones, viviendas, escuelas ni infraestructura pesada sobre la superficie del relleno, debido a su poca capacidad para soportar estructuras pesadas, además de los problemas que pueden ocasionar los hundimientos y la generación de gases.

Para la recuperación del paisaje es conveniente la siembra de plantas de raíces cortas y césped o grama. En muchos casos, después de la cobertura final, el pasto crece en forma espontánea.

Principios básicos de un relleno sanitario.

Se considera oportuno resaltar las siguientes prácticas básicas para la construcción, operación y mantenimiento de un relleno sanitario:

- Supervisión constante durante la construcción con la finalidad de mantener un alto nivel de calidad en la construcción de la infraestructura del relleno y en las operaciones de rutina diaria, todo esto mientras se descarga, recubre los residuos sólidos y compacta la celda para conservar el relleno en óptimas condiciones. Esto implica tener una persona responsable de su operación y mantenimiento.
- Desviación de las aguas de escorrentía para evitar en lo posible su ingreso al relleno sanitario.
- Considerar la altura de la celda diaria para disminuir los problemas de hundimientos y lograr mayor estabilidad.
- El cubrimiento diario con una capa de 0.10 a 0.20 metros de tierra o material similar.
- La compactación de los RSU con capas de 0.20 a 0.30 metros de espesor y finalmente cuando se cubre con tierra toda la celda. De este factor depende en buena parte el éxito del trabajo diario, pues con él se puede alcanzar, a largo plazo, una mayor densidad y vida útil del sitio.
- Lograr una mayor densidad (peso específico), pues resulta mucho más conveniente desde el punto de vista económico y ambiental.
- Control y drenaje de percolados y gases para mantener las mejores condiciones de operación y proteger el ambiente.
- El cubrimiento final de unos 0.40 a 0.60 metros de espesor se efectúa con la misma metodología que para la cobertura diaria; además, debe realizarse de forma tal que pueda generar y sostener la vegetación a fin de lograr una mejor integración con el paisaje natural.

Importancia de la cobertura

El cubrimiento diario de los residuos y la cobertura final del relleno sanitario con tierra es de vital importancia para el éxito de esta obra, debe cumplir las siguientes funciones:

- Minimizar la presencia y proliferación de moscas y aves.
- Impedir la entrada y proliferación de roedores.
- Evitar incendios y presencia de humos.
- Reducir los malos olores.
- Disminuir la entrada de agua de lluvia a los residuos sólidos.
- Orientar los gases hacia los drenajes para evacuarlos del relleno sanitario.
- Darle al relleno sanitario una apariencia estética aceptable.
- Servir como base para las vías de acceso internas.
- Permitir el crecimiento de vegetación.

Una de las diferencias entre un relleno sanitario y un tiradero a cielo abierto es la utilización de material de cobertura (tierra) para confinar los residuos al final de cada jornada diaria y separar adecuadamente los residuos sólidos del ambiente exterior.¹⁵

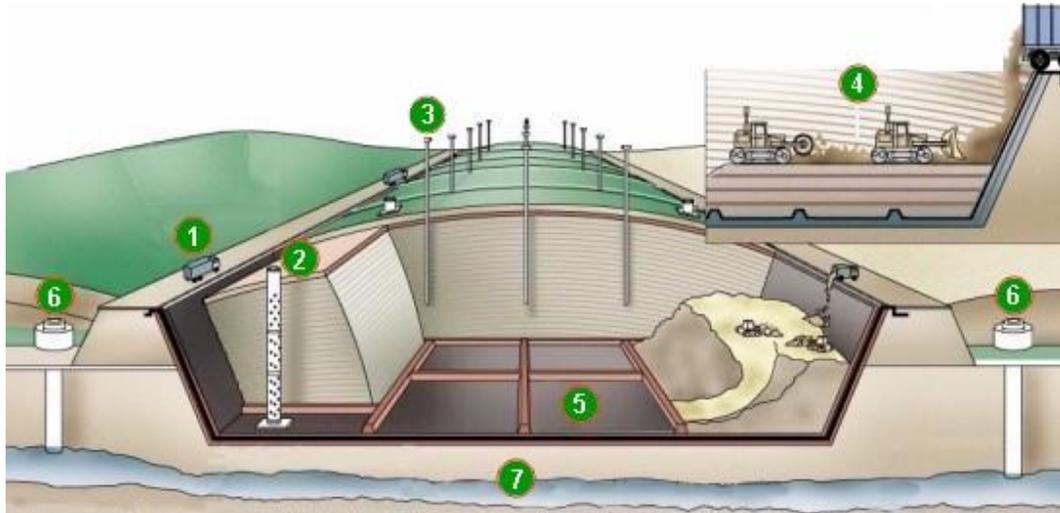


Figura 9. Funcionamiento de un relleno sanitario

La descripción de las etapas del funcionamiento de un relleno sanitario mostrados en la figura 9 se presenta a continuación:

1) Cómo se rellena

El área se divide en módulos. Los camiones circulan por terraplenes hasta el módulo que se está llenando.

2) Gases

La descomposición de los residuos sólidos produce gases, principalmente metano, que se eliminan por venteo.

3) Extracción de líquidos.

Deben ser retirados para recibir tratamiento.

4) Cobertura de los desechos.

Los residuos sólidos deben ser tapados cada día con una capa de tierra compactada de 20 cm.

5) Módulo limitado por una pared de arcilla.

6) Pozos de control de napas

Permiten tomar muestras aguas arriba y aguas abajo, según el escurrimiento de las napas.

7) Impermeabilización

El relleno debe estar perfectamente aislado para evitar que la filtración de líquidos contamine las napas. Para eso la base del relleno se cubre con una capa de polietileno de alta densidad.

¹⁵ http://bvsde.per.paho.org/curso_rsm/e/unidad3.html#i1



I.3 Legislación ambiental para el diseño de un relleno sanitario.

Marco Jurídico Federal.

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.

La base constitucional del municipio es el artículo 115 de nuestra constitución federal, donde se declara: “Los Estados adoptarán para su régimen interior, la forma de gobierno republicano, representativo, popular, teniendo como base de división territorial, organización política y administrativa. En ocho fracciones se describen los principios que deben ser comunes, como reglas básicas a todos los municipios del país”.

Fracción III. Se refiere a servicios públicos municipales que deben prestar los ayuntamientos, como son: agua potable, alcantarillado, alumbrado público, limpia, mercados, centrales de abasto, panteones, rastros, calles, parques, jardines, seguridad pública y tránsito.

Esta relación de servicios no es restrictiva: según sus condiciones, capacidades y necesidades específicas, cuando lo consideren conveniente las legislaturas locales pueden agregar otros servicios. Cuando sea necesario y lo determinen las leyes, los estados pueden proveerlos.

Del precepto constitucional transcrito se derivan estas afirmaciones:

En los estados, el municipio libre es la base de:

- Demarcación territorial
- Organización
 - ✓ Política
 - ✓ Administrativa
 - Los servicios de aseo urbano están a cargo de los municipios.
 - Si es necesario y lo determinan las leyes, los estados han de cooperar o ayudar a los municipios en su responsabilidad respecto de los servicios de limpia urbana.
 - Los municipios tienen a su cargo los demás servicios públicos que las legislaturas locales determinen.
 - Siempre que las condiciones territoriales y socioeconómicas, y su capacidad administrativa y financiera lo permitan, las legislaturas locales han de facultar a los municipios para prestación de otros servicios públicos.
 - Previo acuerdo de sus ayuntamientos, los municipios de un mismo Estado, con sujeción a la ley, pueden coordinarse y asociarse para prestación eficaz de servicios públicos.

Destacan alusiones a la hacienda municipal (Art. 115, fracc. IV) aplicables a la prestación de los servicios de limpia urbana. Expresa: “Los municipios administrarán libremente su hacienda, la cual se formará de los rendimientos de los bienes que le pertenezcan, así como de las contribuciones y otros ingresos que las legislaturas establezcan a su favor, y en todo caso: c) Los ingresos derivados de la prestación de servicios públicos a su cargo”.

Esta atribución es condicionada: “Las legislaturas de los Estados aprobarán las leyes de ingresos de los ayuntamientos y revisarán sus cuentas públicas. Los presupuestos de egresos serán aprobados por los ayuntamientos con base a sus ingresos disponibles (Art. 115, fracción IV, párrafo último)”. En el texto constitucional no se precisan los *servicios de aseo urbano*. De esto y de la facultad conferida a las legislaturas estatales relativas a regulación de los servicios públicos, se infiere que a dichos órganos legislativos compete determinar cuáles actividades han de emprender.



No obstante, se concluye que la regulación en materia de limpia urbana es facultad de la o las legislaturas estatales, con especificación de los alcances de aquélla, inclusive lo concerniente a la índole y el origen de los residuos; esto es: su clasificación y diferenciación de manejo.

Naturalmente, dentro del contexto de la prestación de servicios públicos, entendidos como “toda actividad técnica para satisfacer una necesidad de carácter general cuyo cumplimiento uniforme y continuo deba ser permanentemente asegurado, regulado y controlado por los gobernantes, con sujeción a un mutable régimen jurídico exorbitante del derecho privado, ya que la administración pública, bien mediante particulares facultados para ello por autoridad competente, en beneficio indiscriminado de toda persona” (Fernández Ruiz, Jorge 1995. *Derecho Administrativo*. México, D. F.). Sin embargo, el artículo 116 fracción VII párrafo segundo de la constitución, señala las bases para la coordinación con el fin de que los Estados celebren convenios con sus municipios, a efecto de que estos asuman la prestación de los servicios públicos cuando el desarrollo económico y social lo haga necesario.

Plan Nacional de Desarrollo.

El *Plan Nacional de Desarrollo* se basa en lo dispuesto en los artículos 26 de la *carta magna* y 5º de la *Ley de Planeación*. Como objetivo esencial del plan se postula un desarrollo democrático, que consolide la organización nacional como república representativa y federal, para mejoría constante en lo económico, social y cultural del pueblo. Se proponen cinco objetivos fundamentales:

- I. Fortalecimiento del ejercicio pleno de la soberanía.
- II. Consolidación de un régimen de convivencia social con vigencia jurídica plena.
- III. Desarrollo democrático integral, con intensa participación ciudadana.
- IV. Avance hacia un desarrollo social bajo los principios de equidad y justicia.
- V. Promoción de un crecimiento económico vigoroso, sostenido y sustentable.

Dentro del cuarto objetivo se comenta que, por el crecimiento urbano, su desarrollo enfrenta graves problemas, que agudizan los rezagos en los servicios públicos. Se plantea la problemática de los residuos sólidos, y su afectación a la salud humana. Por ello, como parte de la solución de estos problemas se plantea la necesidad de fortalecer la planeación urbana y la protección ambiental en los centros de población.

Ley de la Administración Pública Federal.

Para conocer el ámbito de competencia de la autoridad federal y sus facultades relativas a la prestación de servicios de limpia urbana en general, sobre la regulación de residuos u otra materia afín, la *Ley Orgánica de la Administración Pública Federal* conforme a ello compete a:

- Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP). **Está facultada para “proyectar y coordinar la planeación nacional del desarrollo”, y para “vigilar el cumplimiento de las obligaciones derivadas de las disposiciones en materia de planeación nacional, así como de programación, presupuestación, contabilidad y evaluación”.**
- **Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL).** Destaca su competencia porque, según el Art. 32, fracciones I y II, se le encomienda “formular, conducir y evaluar la política general de desarrollo social para el combate efectivo a la pobreza; en particular, la de asentamientos humanos, desarrollo urbano y



vivienda”, así como “proyectar y coordinar, con la participación que corresponda a los gobiernos estatales y municipales, la planeación regional”.

También a esta institución compete “promover la construcción de obras de infraestructura y equipamiento para el desarrollo regional y urbano, y el bienestar social, en coordinación con los gobiernos estatales y municipales y con la participación de los sectores social y privado (Art. 32, fracción XV)”. Así, esta institución está facultada para apoyar a estados y municipios en obras que, como se sabe, son parte de la infraestructura y el equipamiento urbanos.

- ✚ **Secretaría de Medio Ambiente, y Recursos Naturales (SEMARNAT).** Conforme al Art. 32 bis, fracciones IV y V, tiene facultades relativas a residuos sólidos, donde se dispone que le incumbe “establecer, con la participación que corresponda a otras dependencias y a las autoridades estatales y municipales, normas oficiales mexicanas sobre residuos sólidos peligrosos”, así como en coordinación con las mismas autoridades vigilar y estimular el cumplimiento de las leyes, normas oficiales mexicanas y programas relacionados con el tema.

Las atribuciones de esta dependencia están dirigidas a la protección del ambiente en general y a algunos elementos en particular. Esto la vincula estrechamente con el servicio de limpia urbana, por el impacto ambiental implicado en diversas etapas del servicio: transporte, almacenamiento, tratamiento y disposición final de residuos, sobre todo si éstos conllevan alguna peligrosidad.

Sin embargo, respecto de la prestación del servicio carece de facultad alguna; al menos en esta parte del análisis, en términos de la ley es una institución puramente normativa.

- ✚ **Secretaría de Economía (SE),** destaca únicamente lo ordenado en el Art. 34, fracción VIII, que la faculta para “regular, orientar y estimular las medidas de protección al consumidor”.

Ley General de Salud.

En esta ley se identifican disposiciones relativas al servicio público de limpia: se promueve y apoya el saneamiento básico, se estipulan normas y acciones tendientes a la protección de la salud humana para mejorar su calidad de vida.

El artículo 116 señala que las autoridades sanitarias establecerán las normas, tomarán las medidas y realizarán las actividades a que se refiere esta Ley, tendientes a la protección de la salud humana ante los riesgos y daños dependientes de las condiciones del ambiente. Por ello, conforme al artículo 118, corresponde a la Secretaría de Salud:

Fracción IV. Promover y apoyar el saneamiento básico.

Fracción V. Asesorar en criterios de ingeniería sanitaria de obras públicas y privadas para cualquier uso. }

Fracción VI. Ejercer el control sanitario de las vías generales de comunicación, incluyendo los servicios auxiliares, obras, construcciones, demás dependencias y accesorios de las mismas y de las embarcaciones, ferrocarriles, aeronaves y vehículos terrestres destinados al transporte de carga y pasajeros.

También la Ley de Salud, señala en el artículo 119 que le corresponde a ella y a los gobiernos de las entidades federativas y a sus respectivos ámbitos de competencia:



Fracción I. Desarrollar investigación permanente y sistemática de los riesgos y daños que para la salud de la población origine la contaminación del ambiente.

Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA).

Esta ley data del año 1988, reformada en diciembre de 1996. Los artículos alusivos al tema de residuos sólidos se encuentran en:

El objetivo de la ley de acuerdo al artículo 1°, es propiciar el desarrollo sustentable y establecer bases para: Preservación, restauración y mejoramiento del ambiente.

Aprovechamiento sustentable, preservación y, en su caso, restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de modo que la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad sean compatibles con la preservación de los ecosistemas.

Prevención y control de la contaminación del aire, el suelo y el agua.

Ejercicio de las atribuciones que en materia ambiental corresponde a la federación, los Estados y los municipios. Instauración de procedimientos de coordinación, inducción y concertación entre:

- Autoridades
- Sectores social y privado
- Personas
- Grupos sociales, etc.

En el artículo 3°, fracciones XXXI y XXXII, se define a residuo y residuos peligrosos.

Residuo. Cualquier material generado en procesos de extracción, beneficio, transformación producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó.

Residuos peligrosos. Todos aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológicas infecciosas representen peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente.

De acuerdo al artículo 5°, fracción VI, es competencia federal la regulación y el control de la generación, el manejo y la disposición final de residuos peligrosos para el ambiente y los ecosistemas.

En los artículos 7° -fracción VI- y 8° -fracción IV-. Se establece que:

Los Estados tienen facultades para regular los sistemas de recolección, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final de residuos sólidos e industriales no considerados altamente peligrosos.

Los municipios tienen facultad para aplicar las disposiciones jurídicas relativas a prevención y control de los efectos sobre el ambiente ocasionados por generación, transporte, almacenamiento, manejo, tratamiento y disposición final, también de los residuos sólidos e industriales no considerados peligrosos.

Conforme al artículo 11°, podrán la Federación, los Estados y el Distrito Federal suscribir convenios o acuerdos de coordinación a fin de que estos dos últimos órdenes de gobierno asuman la función de controlar los residuos



peligrosos de baja peligrosidad, así como para realizar acciones de inspección y vigilancia en esta materia. Los Estados a su vez podrán suscribir entre sí convenios o acuerdos de coordinación y colaboración administrativa, con el propósito de atender y resolver problemas ambientales comunes y ejercer su atribución es a través de las instancias que al efecto determinen, atendiendo a lo dispuesto en las leyes locales que resulten aplicables. Las mismas facultades podrán ejercer los municipios entre sí, aunque pertenezcan a entidades federativas diferentes, de conformidad con lo que establezcan las leyes señaladas.

Es Facultad Federal según el artículo 28° fracción IV, la evaluación del impacto ambiental de las instalaciones de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos peligrosos, y de los radioactivos, y por ello se requiere autorización federal.

Para prevención y control de la contaminación del suelo, el artículo 134 fracciones II, III y V describen algunos criterios, destacando:

“Deben ser controlados los residuos, en tanto que constituyen la principal fuente de contaminación de los suelos”

“Es necesario prevenir y reducir la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; incorporar técnicas y procedimientos para su reuso y reciclaje, así como regular su manejo y disposición final eficientes”

“En los suelos contaminados por la presencia de residuos peligrosos deberán llevarse a cabo las acciones necesarias para recuperar o restablecer sus condiciones, de tal manera que puedan ser utilizados en cualquier tipo de actividad prevista por el programa de desarrollo urbano o de ordenamiento ecológico que resulte aplicable”

Tales criterios se deben considerar en los casos siguientes:

- “La operación de los sistemas de limpia y de disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios”.
- “La generación, manejo y disposición final de residuos sólidos industriales y peligrosos, así como en las autorizaciones y permisos que al efecto se otorguen”

En el artículo 137, se señala que en el funcionamiento de los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reuso tratamiento y disposición final de residuos sólidos, la autoridad federal ambiental expedirá las normas oficiales mexicanas para establecer lo referente a sitios, diseño, construcción y operación de instalaciones para disposición final de residuos sólidos municipales.

La autoridad ambiental federal puede celebrar acuerdos de coordinación y asesoría con los gobiernos estatales y municipales para implantación y mejoramiento de sistemas de recolección, tratamiento y disposición final de residuos sólidos, incluida la elaboración de inventarios de éstos y sus fuentes generadoras, de acuerdo al artículo 138.

En México está prohibido, de acuerdo al artículo 142, la importación de residuos para derrame, depósito, confinamiento, almacenamiento, incineración o cualquier tratamiento para su destrucción o disposición final en el territorio nacional o en las zonas donde la nación va a ejercer su soberanía y jurisdicción. Este principio debe ser cumplido por los municipios.

“El artículo 151 señala que la responsabilidad del manejo y disposición final de los residuos peligrosos corresponde a quien los genera. En el caso de que se contraten los servicios de manejo y disposición final de los residuos peligrosos con empresas autorizadas por la SEMARNAT y los residuos sean entregados a dichas



empresas, la responsabilidad por dichas operaciones será de éstas, independientemente de la responsabilidad que, en su caso, tenga quien los genera”. Este principio debe ser desarrollado a escala estatal y municipal.

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR). Esta ley data de octubre de 2003. Sus disposiciones son de orden público e interés social y tienen por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente adecuado y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos, de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación.

Los artículos alusivos al tema de residuos sólidos se encuentran en:

Artículo 10.- Los municipios tienen a su cargo las funciones de manejo integral de residuos sólidos urbanos, que consisten en la recolección, traslado, tratamiento, y su disposición final, conforme a las siguientes facultades:

I. Formular, por sí o en coordinación con las entidades federativas, y con la participación de representantes de los distintos sectores sociales, los Programas Municipales para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos, los cuales deberán observar lo dispuesto en el Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos correspondiente;

II. Emitir los reglamentos y demás disposiciones jurídico-administrativas de observancia general dentro de sus jurisdicciones respectivas, a fin de dar cumplimiento a lo establecido en la presente Ley y en las disposiciones legales que emitan las entidades federativas correspondientes;

III. Controlar los residuos sólidos urbanos;

IV. Prestar, por sí o a través de gestores, el servicio público de manejo integral de residuos sólidos urbanos, observando lo dispuesto por esta Ley y la legislación estatal en la materia;

V. Otorgar las autorizaciones y concesiones de una o más de las actividades que comprende la prestación de los servicios de manejo integral de los residuos sólidos urbanos;

VI. Establecer y mantener actualizado el registro de los grandes generadores de residuos sólidos urbanos;

VII. Verificar el cumplimiento de las disposiciones de esta Ley, normas oficiales mexicanas y demás ordenamientos jurídicos en materia de residuos sólidos urbanos e imponer las sanciones y medidas de seguridad que resulten aplicables;

VIII. Participar en el control de los residuos peligrosos generados o manejados por microgeneradores, así como imponer las sanciones que procedan, de acuerdo con la normatividad aplicable y lo que establezcan los convenios que se suscriban con los gobiernos de las entidades federativas respectivas, de conformidad con lo establecido en esta Ley;

IX. Coadyuvar en la prevención de la contaminación de sitios con materiales y residuos peligrosos y su remediación;

X. Efectuar el cobro por el pago de los servicios de manejo integral de residuos sólidos urbanos y destinar los ingresos a la operación y el fortalecimiento de los mismos, y

XI. Las demás que se establezcan en esta Ley, las normas oficiales mexicanas y otros ordenamientos jurídicos que resulten aplicables.



Artículo 15.- La Secretaría agrupará y subclasificará los residuos peligrosos, sólidos urbanos y de manejo especial en categorías, con el propósito de elaborar los inventarios correspondientes, y orientar la toma de decisiones basada en criterios de riesgo y en el manejo de los mismos.

Artículo 18.- Los residuos sólidos urbanos podrán subclasificarse en orgánicos e inorgánicos con objeto de facilitar su separación primaria y secundaria, de conformidad con los Programas Estatales y Municipales para la Prevención y la Gestión Integral de los Residuos, así como con los ordenamientos legales aplicables.

Artículo 20.- La clasificación de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, sujetos a planes de manejo se llevará a cabo de conformidad con los criterios que se establezcan en las normas oficiales mexicanas que contendrán los listados de los mismos y cuya emisión estará a cargo de la Secretaría.

Por su parte, los gobiernos de las entidades federativas y de los municipios, deberán publicar en el órgano de difusión oficial y diarios de circulación local, la relación de los residuos sujetos a planes de manejo y, en su caso, proponer a la Secretaría los residuos sólidos urbanos o de manejo especial que deban agregarse a los listados a los que hace referencia el párrafo anterior.

Artículo 96.- Las entidades federativas y los municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, con el propósito de promover la reducción de la generación, valorización y gestión integral de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, a fin de proteger la salud y prevenir y controlar la contaminación ambiental producida por su manejo.

Artículo 97.- Las normas oficiales mexicanas establecerán los términos a que deberá sujetarse la ubicación de los sitios, el diseño, la construcción y la operación de las instalaciones destinadas a la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, en rellenos sanitarios o en confinamientos controlados.

Las normas especificarán las condiciones que deben reunir las instalaciones y los tipos de residuos que puedan disponerse en ellas, para prevenir la formación de lixiviados y la migración de éstos fuera de las celdas de confinamiento. Asimismo, plantearán en qué casos se puede permitir la formación de biogás para su aprovechamiento.

Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2004, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

En el punto 6 de esta norma: “Especificaciones para la selección del sitio”, se establecen en el punto 6.3 los estudios y análisis, en el sitio, previos a la construcción y operación de un sitio de disposición final que a continuación se mencionan los puntos más relevantes:

✚ Estudio geotécnico

Se deberá realizar para obtener los elementos de diseño necesarios y garantizar la protección del suelo, subsuelo, agua superficial y subterránea, la estabilidad de las obras civiles y del sitio de disposición final a construirse, incluyendo al menos las siguientes pruebas:

- ✚ Exploración y Muestreo:
 - ✓ Exploración para definir sitios de muestreo.
 - ✓ Muestreo e identificación de muestras.
 - ✓ Análisis de permeabilidad de campo.
 - ✓ Peso volumétrico In-situ



✚ Estudios en laboratorio:

- Clasificación de muestras según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos.
- Análisis granulométrico
- Permeabilidad
- Prueba Proctor
- Límites de Consistencia (Límites de Atterberg)
- Humedad

Cabe resaltar que en el presente trabajo se efectuaron todos los estudios y análisis en laboratorio que se mencionan anteriormente.

En el punto número 7 de esta norma, describe las características constructivas y operativas del sitio de disposición final, y es de suma importancia destacar el punto 7.1 que describe lo siguiente: “Todos los sitios de disposición final deben contar con una barrera geológica natural o equivalente, a un espesor de un metro y un coeficiente de conductividad hidráulica, de al menos 1×10^{-7} cm /seg sobre la zona destinada al establecimiento de las celdas de disposición final; o bien, garantizarla con un sistema de impermeabilización equivalente.

Para el presente trabajo este dato es fundamental ya que es el parámetro a cumplir mediante la aplicación del estabilizador de suelos propuesto, para que se cumpla o rechace la hipótesis.



I.4 Factores que influyen en la producción de lixiviados, volúmenes de generación y Características físicas, químicas y biológicas.

La gran mayoría de los residuos orgánicos son depositados en rellenos sanitarios o a cielo abierto, algunos otros son utilizados como composteo para su aprovechamiento como abono, sin embargo muchos de estos residuos son lavados por el agua ya sea de lluvia, o de otras fuentes, llevándose con ella las sustancias producidas en su descomposición.

Los lixiviados son líquidos que se generan por la liberación del exceso de agua de los residuos sólidos y por la percolación de agua pluvial a través de los estratos de residuos sólidos que se encuentran en las fases de composición (Cruz *et. al.*, 2001). El lixiviado es considerado como el principal y gran contaminante de un relleno. Existen numerosos estudios en los que se presentan evidencias de como estos líquidos pueden contaminar aguas superficiales y subterráneas (Cossu *et. al.*, 2001; Ding *et. al.*, 2001), por lo que la estimación de su producción a lo largo de la vida del relleno sanitario y la variación de su composición son datos valiosos para planear adecuadamente las obras de control que minimicen impactos negativos al medio ambiente.

El lixiviado de un relleno sanitario es un agua residual compleja, con considerables variaciones en la composición y el flujo volumétrico (Trebouet *et. al.*, 2001). La calidad de los lixiviados es determinada fundamentalmente por la composición de los residuos sólidos depositada en el relleno, por los procesos de reacción bioquímica que tienen lugar en el mismo, por las condiciones de manejo del lixiviado y por las condiciones ambientales (Ehring, 1999; Borzacconi *et. al.*, 1996). De acuerdo con lo anterior, la concentración y composición de contaminantes en el lixiviado pueden ser muy diferentes según las condiciones antes mencionadas, pero principalmente la edad del relleno. De hecho, las características de los lixiviados varían incluso dentro de un mismo relleno sanitario dado que pueden coexistir etapas aerobias de los frentes de trabajo de los rellenos, con las fases acidogénicas de las primeras semanas del relleno y con las metanogénicas que siguen a la fase ácida. Se hace necesario por tanto, realizar estudios de tratabilidad de cada lixiviado de cada relleno sanitario, por lo que no es posible transferir directamente el tipo de tratamiento aplicado a un lixiviado (Niininen *et. al.*, 1995; Agudelo, 1996).

En la literatura consultada es evidente el interés e investigación por los lixiviados producidos en los rellenos sanitarios, en la cual se señala tanto los problemas ecológicos que pueden ocasionar en el agua o en el suelo, como su composición y sus características, pero también se sugiere su monitoreo y su tratamiento, ya sea biológico, químico, físico, o su recirculación dentro del relleno nuevamente.

Por otro lado, como lo dice Crawford y Smith 1985, uno de los principales problemas en los rellenos sanitarios es la descarga de lixiviados que se producen cuando el agua pasa a través del vertedero, y por lo tanto empieza a contaminarse con varios compuestos orgánicos e inorgánicos. Subsecuentemente si los lixiviados llegan al suelo circundante o a las aguas subterráneas o superficiales pueden ocasionar graves problemas de contaminación.

En el país se generan 83, 831 ton/día de residuos sólidos, de las cuales 11, 541 toneladas corresponden al Distrito Federal. Gran parte de estos residuos sólidos se disponen en rellenos sanitarios en donde, debido a la percolación del agua a través de los residuos sólidos se generan efluentes líquidos llamados lixiviados, que por su toxicidad y volumen representan un alto riesgo de contaminación de los mantos acuíferos, por lo que es necesario realizar la colección y el tratamiento adecuado de estas corrientes contaminantes (INE, 1999).

La edad del relleno sanitario y, por ende el grado de estabilización de los residuos, tienen un efecto en la composición de los lixiviados. Los lixiviados se pueden clasificar en lixiviados jóvenes, intermedios y estabilizados. Los lixiviados jóvenes presentan una carga orgánica alta (DQO > 20,000 mg/l), concentración de ácidos carboxílicos aproximada del 80% de la carga orgánica, materia orgánica rápidamente biodegradable



(DBO/DQO \geq 0.3), una relación de COT/DQO \approx 0.3, pH alrededor de 6.5, concentración de metales de 2 g/l, preponderancia de ácidos grasos volátiles y compuestos de alto peso molecular (Ozzane, 1990).

Los lixiviados intermedios muestran una carga orgánica entre 3,000 a 15,000 mg/l, concentración de ácidos carboxílicos que representan del 20 al 30% de la carga orgánica, la relación DBO/DQO \approx 0.2, un pH casi neutro y compuestos de peso molecular superior a 500 g/mol (Mertens *et al.*, 1995; Ozzane, 1990). Los lixiviados estabilizados tienen una carga orgánica $<$ 2,000 mg/l, ausencia de ácidos carboxílicos, baja biodegradabilidad DBO/DQO \leq 0.1, COT / DQO \approx 0.4 indicando la presencia de compuestos difícilmente oxidables, presencia de compuestos de elevado peso molecular superior a 5000 g/mol, pH superior a 8 y concentración de metales menor de 50 mg/l (Ehrig, 1983; Ozzane, 1990).

La contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, que puede darse por escurrimientos e infiltraciones de lixiviados, dadas las concentraciones y los múltiples componentes peligrosos presentes en el lixiviado, tiene grandes repercusiones, pues se convierten en focos de infección, sin olvidar la contaminación del suelo y aire. Los contaminantes presentes en el lixiviado pueden producir cáncer, enfermedades genéticas, esterilidad, abortos, enfermedades coronarias y otros efectos de tipo crónico, que pueden aparecer años después de la exposición al riesgo (Rodríguez *et al.*, 1997; Schrab *et al.*, 1993).

Para el tratamiento de lixiviados se utilizan dos grandes grupos de procesos (Ehrig, 1984): los biológicos que son aplicados a lixiviados jóvenes e intermedios, y los fisicoquímicos que se aplican a lixiviados viejos o estabilizados.

Dentro de los procesos para el tratamiento de lixiviados estabilizados clarificados se encuentra la adsorción con carbón activado, mediante la cual es factible remover constituyentes orgánicos no polares y compuestos recalcitrantes de alto peso molecular. Entre las ventajas que presenta, está su gran área superficial y la capacidad de servir como soporte de microorganismos. La desventaja es que necesita ser frecuentemente regenerado lo que eleva los costos del tratamiento. La capacidad de adsorción depende del tamaño de poro, área superficial, pH de la solución. Permite una remoción de color de entre 50-70 % de DQO y alrededor del 60 % principalmente (Amokrane *et al.*, 1997).

Andrews *et al.* (1975) observaron los efectos benéficos de la biodegradación (aumento en la remoción de materia orgánica) cuando es usado carbón activado granular como soporte de microorganismos conscientemente promovidos en el tratamiento fisicoquímico de agua. Rice *et al.* (1977) proponen el término carbón activado biológico (CAB), aunque hoy en día es conocido como adsorción sobre carbón activado asistido biológicamente. El mecanismo que se presenta en este proceso es complejo, pues interaccionan la adsorción y la biodegradación, esto se debe a que es difícil conocer la fracción removida por adsorción, por biodegradación o por combinación de ambas.

Características

Las características de los lixiviados dependen principalmente de los residuos de los que provienen. Es por ello que resulta muy complejo establecer una composición específica de los lixiviados. A pesar de esto la composición puede ser medida por parámetros físicos, químicos inorgánicos, químicos orgánicos y toxicidad.

La constitución química de los lixiviados de un relleno sanitario variará con el tiempo, debido a la biodegradabilidad que se produce en ellos por diferentes factores. Como se ha mencionado anteriormente, los lixiviados se pueden clasificar en jóvenes y maduros.

Dentro de los 2 primeros años, los lixiviados jóvenes de un relleno sanitario contienen la materia orgánica fácilmente biodegradable. Así éstos tienden a ser ácidos con un pH que va de 6 a 7. Al mismo tiempo su DBO₅



(demanda bioquímica de Oxígeno) va de 20,000 a 40,000 mg/l, el amonio fluctúa entre 1,000 y 2,000 mg/l y los nitratos se encuentran en muy bajas cantidades. Por el contrario los lixiviados Maduros, después de transcurrido varios años, el pH se incrementa a un intervalo de 7 a 8, con una disminución de DBO₅ de 500 - 3000 mg/l, al igual que una baja en el contenido total de nutrientes.

Es importante subrayar desde una perspectiva ambiental, que las sustancias contenidas en los lixiviados se mueven dentro del suelo, de acuerdo como se mueve el agua de escurrimiento, obedeciendo a los fenómenos de infiltración, percolación, evaporación, difusión y advección, por lo que resulta importante tener un control y monitoreo adecuado, tratándose de un relleno sanitario.

La producción de lixiviados en el relleno sanitario depende, por un lado, de las características físicas de los residuos sólidos depositados. Por otro lado, es función de las características meteorológicas de la localidad y del diseño del relleno. Al igual que el biogás, los lixiviados son producidos durante la vida útil del relleno, como durante las etapas posteriores.

La composición química de los lixiviados varía ampliamente dependiendo de la edad del relleno sanitario y de los eventos precedentes al tiempo del muestreo para su análisis. Esto se considera para el caso en que se tome una muestra de lixiviados en las distintas fases de descomposición de los residuos en el relleno, dado que la concentración de DBO₅, DQO (demanda química de Oxígeno), conductividad eléctrica y metales pesados será distinta en cada una de las fases. (Trebouet *et. al.*, 2001).

El pH de los lixiviados depende no solamente de la concentración de los ácidos presentes, sino también de la presión parcial de CO₂ en los gases del relleno que están en contacto con los lixiviados. La biodegradabilidad de los lixiviados variará con respecto al tiempo, los cambios en esta biodegradabilidad pueden ser monitoreados con una revisión de la relación que existe entre DBO₅/DQO. Inicialmente, esta relación se encuentra en el rango de 0.5 o mayor. La relación DBO₅/DQO que se encuentra en el rango de 0.4 a 0.6 se debe tomar como un indicador de que la materia orgánica en los lixiviados está siendo biodegradada rápidamente.

La generación esperada de lixiviados, se estima mediante la realización de un balance hídrico en el relleno sanitario. En este balance, se consideran la humedad propia de los residuos, la precipitación promedio de la región, la producción de biogás y el porcentaje de recirculación de lixiviados, entre otros factores.

Los lixiviados percolados a través de las capas de los diversos estratos se removerán por acción de filtración y adsorción de los constituyentes químicos y biológicos en los diversos materiales que componen los estratos del suelo.

Un sistema de control para los lixiviados, es la distribución de capas de arcilla utilizadas como material de protección, ésta permite reducir favorablemente los líquidos filtrados de los lixiviados a través del relleno. La arcilla es un material que favorece la capacidad de absorción y retienen muchos de los constituyentes químicos encontrados en los lixiviados. Sin embargo, existe un método compuesto de la combinación de geomembranas y arcilla, que ofrece mayor resistencia a los movimientos de los gases y de los lixiviados.

Este método combinado, tiene el objetivo de minimizar la infiltración de lixiviados en la superficie del suelo y de eliminar potencialmente la contaminación de los mantos freáticos y las aguas subterráneas.

En el cuadro número 2 se muestran las características de un lixiviado crudo, un lixiviado clarificado y un clarificado filtrado.

Cuadro No. 2. Caracterización del lixiviado crudo, clarificado y clarificado - filtrado¹⁶

Parámetro	Lixiviado Crudo	Lixiviado Clarificado	Lixiviado Clarificado - Filtrado
pH	8.03	5.5	5.5
Color (mg Pt-Co / L)	3530	186	168
DQO (mg O ₂ / L)	2930	641	640
DBO (mg O ₂ / L)	280	-	-
SDT (g / L)	11.5	10.6	10.5
Turbiedad (UNT)	14.2	13.5	13.4
Conductividad (mS / cm)	20.3	18.87	18.8

Reacciones que se generan en un relleno sanitario.

A) Cambios físicos, químicos y biológicos

Los RSU depositados en un relleno sanitario presentan una serie de cambios físicos, químicos y biológicos de manera simultánea e interrelacionada. Estos cambios se describen a continuación a fin de dar una idea de los procesos internos que se presentan cuando los residuos son confinados.

Cambios físicos. Los cambios físicos más importantes están asociados con la compactación de los RSU, la difusión de gases dentro y fuera del relleno sanitario, el ingreso de agua y el movimiento de líquidos en el interior y hacia el subsuelo, y con los asentamientos causados por la consolidación y descomposición de la materia orgánica depositada.

El movimiento de gases es de particular importancia para el control operacional y el mantenimiento del sistema. Por ejemplo, cuando el biogás se encuentra atrapado, la presión interna puede causar agrietamiento de la cubierta y fisuras, lo que permite el ingreso de agua de lluvia al interior del relleno sanitario, lo que provoca mayor generación de gases y lixiviados. Lo anterior, contribuye a que se produzcan hundimientos y asentamientos diferenciales en la superficie y que se desestabilicen los terraplenes por el mayor peso de la masa de desechos.

Reacciones químicas. Las reacciones químicas que ocurren dentro del relleno sanitario e incluso en los botaderos de residuos sólidos, abarcan la disolución y suspensión de materiales y productos de conversión biológica en los líquidos que se infiltran a través de la masa de los RSU, la evaporación de compuestos químicos y agua, la adsorción de compuestos orgánicos volátiles, la deshalogenación y descomposición de compuestos orgánicos y las reacciones de óxido - reducción que afectan la disolución de metales y sales metálicas. (La importancia de la descomposición de los productos orgánicos reside en que estos materiales pueden ser transportados fuera del relleno sanitario o del botadero de residuos sólidos con los lixiviados.)

Reacciones biológicas. Las más importantes reacciones biológicas que ocurren en los rellenos sanitarios son realizadas por los microorganismos aerobios y anaerobios, y están asociadas con la fracción orgánica contenida en los RSU. El proceso de descomposición empieza con la presencia del oxígeno (fase aerobia); una vez que los residuos son cubiertos, el oxígeno empieza a ser consumido por la actividad biológica. Durante esta fase se genera principalmente bióxido de carbono. Una vez consumido el oxígeno, la descomposición se lleva a cabo sin él (fase

¹⁶ BIOADSORCIÓN DE LIXIVIADOS VIEJOS CLARIFICADOS, Durán, Ramírez, Durán Moreno, 1997.



anaerobia): aquí la materia orgánica se transforma en bióxido de carbono, metano y cantidades traza de amoníaco y ácido sulfhídrico.

B) Generación de líquidos y gases

Casi todos los residuos sólidos sufren cierto grado de descomposición, pero es la fracción orgánica la que presenta los mayores cambios. Los subproductos de la descomposición están integrados por líquidos, gases y sólidos.

Líquido lixiviado o percolado. La descomposición o putrefacción natural de los residuos sólidos produce un líquido maloliente de color negro, conocido como lixiviado o percolado, parecido a las aguas residuales domésticas, pero mucho más concentrado.

Las aguas de lluvia que atraviesan las capas de los residuos sólidos aumentan su volumen en una proporción mucho mayor que la que produce la misma humedad de los RSU, de ahí que sea importante interceptarlas y desviarlas para evitar el incremento de lixiviado; de lo contrario, podría haber problemas en la operación del relleno y contaminación en las corrientes y nacimientos de agua y pozos vecinos.

Gases. Un relleno sanitario se comporta como un digestor anaerobio. Debido a la descomposición o putrefacción natural de los RSU, no solo se producen líquidos sino también gases y otros compuestos. La descomposición de la materia orgánica por acción de los microorganismos presentes en el medio tiene dos etapas: aerobia y anaerobia.

La *aerobia* es aquella fase en la cual el oxígeno que está presente en el aire contenido en los intersticios de la masa de residuos enterrados es consumido rápidamente.

La *anaerobia*, en cambio, es la que predomina en el relleno sanitario porque no pasa el aire y no existe circulación de oxígeno, de ahí que se produzcan cantidades apreciables de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), así como trazas de gases de olor punzante, como el ácido sulfhídrico (H_2S), amoníaco (NH_3) y mercaptanos.

El gas metano reviste el mayor interés porque, a pesar de ser inodoro e incoloro, es inflamable y explosivo si se concentra en el aire en una proporción de 5 a 15% en volumen; los gases tienden a acumularse en los espacios vacíos dentro del relleno y aprovechan cualquier fisura del terreno o permeabilidad de la cubierta para salir. Cuando el gas metano se acumula en el interior del relleno y migra a las áreas vecinas, puede generar riesgos de explosión. Por lo tanto, se recomienda una adecuada ventilación de este gas, aunque en los pequeños rellenos este no es un problema muy significativo.

C) Hundimientos y asentamientos diferenciales

En el relleno sanitario se producen también hundimientos (asentamientos uniformes o fallas) que son el problema más obvio y fácil de controlar con una buena compactación; además, asentamientos diferenciales en la superficie, que con el tiempo originan depresiones y grietas de diversos tamaños, lo que causa encharcamientos de agua y un incremento de lixiviados y gases. Estos problemas dependen de la configuración y altura del relleno, del tipo de desechos enterrados, del grado de compactación y de la precipitación pluvial en la zona.

La peligrosidad de los lixiviados

La carga orgánica de los lixiviados, cuantificada por el parámetro DBO, suele ser 100 veces superior al DBO que presentan los residuos de origen cloacal. Estos últimos pueden diluirse con el agua de lluvia o ser volcados en cursos de agua, ya que las bacterias aeróbicas presentes en esos cauces permite un rápido proceso de degradación biológica.

Pero el caso de los lixiviados es diferente: su carga orgánica desarrolla un sistema biológico tan sediento de Oxígeno que sus bacterias terminan tomándose todo el aire presente en el curso de agua. Esto es, porque tiene tendencia a consumir oxígeno con mayor rapidez a la que permite su capacidad de autodepuración. Es decir, en casos extremos pueden convertir el sistema aeróbico del cauce en otro anaeróbico, sin oxígeno.

Bastante conocido es por ejemplo el impacto de la impermeabilización deficiente de los rellenos sanitarios, una de las razones por las cuales aumenta la generación de lixiviados al tener un sistema de captación de fondo, lo cual permite que la generación de éstos sea más importante. Antiguamente, en los rellenos sin esta impermeabilización, los lixiviados infiltraban al suelo con las consecuencias ambientales que ocasionaba, pero no generaban un volumen importante a manejar. Otro factor asociado a la generación de lixiviados es el proceso de compactación de los residuos, que si bien resulta necesario para el manejo de los mismos reduciendo su volumen, trae aparejado un aumento de lixiviados instantáneos. A estos factores anteriores, debemos sumar otros más comunes, pero no por ello menos importantes, como el aporte directo de agua de lluvia al relleno.

Se requiere de una serie de sistemas de control de las escorrentías. El primero corresponde a la captación de todas las aguas de escorrentía superficial que se generan durante las lluvias en las zonas de disposición y sus depresiones, que deben ser captadas por un “canal interceptor” impermeabilizado en pendiente que lleve a un sistema de acumulación. El segundo sistema de captación de escorrentía debe ser sub-superficial, donde esté prevista la construcción de “drenes de captación” en el fondo de los puntos de salida de las depresiones, actuando como barreras.

Además de estos sistemas de control, se necesitan una serie de sistemas de monitoreo y controles operativos al interior del área del proyecto. Finalmente, se recomienda un plan de monitoreo externo que controle puntos de aguas superficiales y subterráneas, a fin de verificar que no se genere ningún efecto negativo ambiental aguas abajo del relleno.

En la figura 10 se ilustra el proceso de generación de lixiviado en un relleno sanitario.

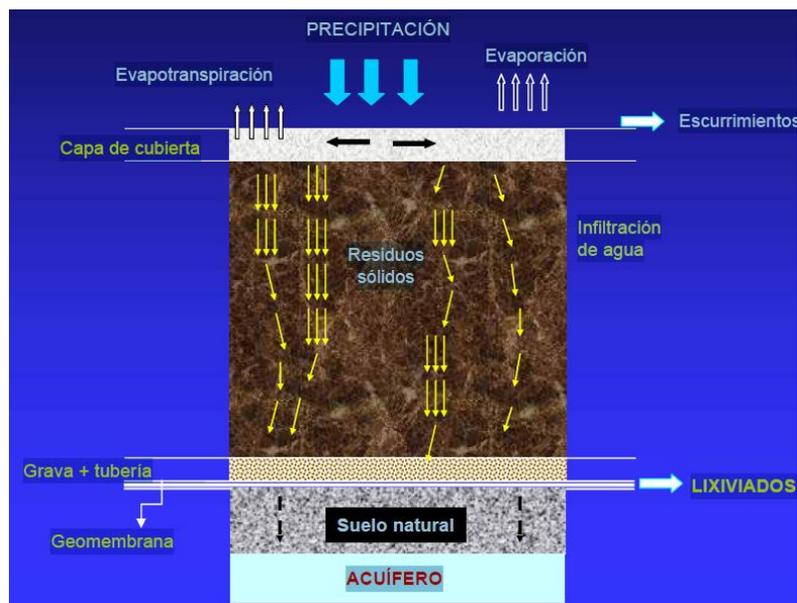


Figura 10. Generación de lixiviados en relleno sanitario.¹⁷

¹⁷ M. T. Orta. Disposición final de Residuos Sólidos Municipales en Rellenos Sanitarios, 2005



Composición de los lixiviados

La composición del lixiviado de un relleno sanitario ha sido objeto de considerable investigación por mucho tiempo. Sin embargo, su proceso de generación es complejo y difícil de modelar. Los lixiviados están en muchos casos altamente contaminados y pueden degradar las aguas freáticas y superficiales. Por tal motivo, serán revisadas las características químicas y microbiológicas de los lixiviados de los rellenos sanitarios municipales.

- **Composición Química.**- En diversos estudios se ha investigado la calidad del lixiviado bajo condiciones controladas en laboratorio y en el campo. Muchos factores están involucrados en su conformación: condiciones geológicas locales, composición de los desechos e incluso el diseño del relleno sanitario. Asimismo, el lixiviado contacta con una serie de materiales existentes en el relleno: pinturas, plaguicidas, aceites de motor, etc. (Tammemagi, 1999).

Aunque la composición del lixiviado es sumamente variable, puede categorizarse en tres grupos: metales pesados, sólidos disueltos y compuestos orgánicos. Cada uno de ellos debería ser analizado por separado al momento de involucrarlos en los sistemas de tratamiento de lixiviados (Sirman, 1995).

La composición química del lixiviado varía dependiendo de la edad del relleno sanitario. Por ejemplo, en la fase ácida de descomposición (aerobia), el pH es bajo y las concentraciones de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), nutrientes y metales pesados es alta. Durante la fase metanogénica (anaerobia), no obstante, el pH fluctúa entre 6.5 a 7.5, y las concentraciones de DBO, DQO, nutrientes y metales pesados decrecen, en tanto los metales poseen menor solubilidad para valores neutros de pH. En general, la composición del lixiviado cambia de una alta concentración de material biológico a una alta concentración de metales pesados y sólidos disueltos totales a medida que madura la edad del relleno sanitario (Tammemagi, 1999).

Por otro lado, la biodegradabilidad del lixiviado varía con el tiempo. Se pueden supervisar los cambios en su biodegradabilidad mediante el control de la relación DBO/DQO. Inicialmente, las relaciones estarán en el orden de 0.5 o más. Las relaciones en el rango de 0.4 a 0.6 se toman como un indicador de que la materia orgánica en los lixiviados es fácilmente biodegradable. En los rellenos antiguos, la relación DBO/DQO está a menudo en el rango de 0.05 a 0.2. La relación cae porque los lixiviados de los rellenos antiguos normalmente contienen ácidos húmicos y fúlvicos, que no son fácilmente biodegradables (Tchobanoglous, 1994).

En el cuadro número 3 se presenta información sobre la composición química de los lixiviados comparada con las aguas residuales municipales.

Cuadro No. 3. Composición química de los lixiviados.

Lixiviados de rellenos sanitarios v.s Agua residual municipal		
Parámetro (mg/l)	Lixiviados	Agua residual
DQO	89,520	500
DBO	33,360	220
COT	2,798	160
ST	59,000	10 (ml/l)
SDT	44,900	500
SST	700	220
Alcalinidad total	20,850	100
Fósforo total	130	8
N-Amoniacal	1106	25

Fuente: ZOLTEN, N.G. (1991). *Water Environment & Technology*, pp. 63 – 66.

En el cuadro número 4 se presentan las características físico químicas de los rellenos sanitarios en México.

Cuadro No. 4. Características fisicoquímicas de los lixiviados de rellenos sanitarios en México¹⁸.

PARÁMETRO	Relleno Sanitario Bordo Poniente Etapa I y II	Relleno Sanitario Prados de la Montaña
pH	8 - 9	8.6
Conductividad (μ mhos/cm)	40,000	37,433
Turbiedad (UNT)	90	60
Color (Pt-Co)	8,000	7,333
Alcalinidad como CaCO_3 (mg/l)	12,000	9,650
N-NH ₄ (mg/l)	1,200	2,744
DQO total (mg/l)	4,500	37,667
DBO ₅ total (mg/l)	450	13,821
DBO/DQO	0.1	0.37

M.T. Orta, I. Monje R., 1998

- **Composición Microbiológica.**- Los residuos sólidos municipales contienen una gran población microbiana y pueden ser altamente combinados con microorganismos patógenos. Los desechos son un excelente medio para mantener la supervivencia de patógenos. Los rellenos a menudo contienen excrementos de mascotas, restos de animales, pañales desechables, lodos de cloacas, etc. Obviamente, todos ellos poseen un gran peligro para la salud humana.

Por otro lado, un relleno sanitario debería diseñarse para estimular el proceso de descomposición del material orgánico por la acción microbiana tan rápida y completamente como sea posible. Lamentablemente, esto lleva a un dilema. Por un lado, la descomposición microbiana trabaja más cuando los desechos están húmedos, esto es, cuando mucha parte del lixiviado origina condiciones anaeróbicas. En contraparte, en un moderno diseño de relleno sanitario, se busca que la menor cantidad de agua posible ingrese al mismo (Tammemagi, 1999). El cuadro No. 5. Muestra las bacterias específicas identificadas en los lixiviados de los rellenos sanitarios:

¹⁸ M.T. Orta, I. Monje R., 1998



Cuadro No. 5: Bacterias específicas identificadas en el lixiviado (Tchobanoglous, 1994)

Grupos bacterianos como indicadores fecales	Intervalo de valores reportados	Tipo de estudio
<u>Grupo Indicador</u>		
<u>Streptococos fecales</u>	0 - 48 * 10 ⁶ organismos/100 ml	Laboratorio, relleno sanitario, conteo de placas.
	< 0.1-3 millones UFC ^(*) /100 ml	
	<2-490000 NMP ^(**) /100 ml	
<u>Coliformes fecales</u>	<0-1.3 * 10 ⁶ organismos/100 ml	Laboratorio, relleno sanitario, conteo de placas.
	<0.1-100000 UFC/100 ml	
	<2-94000 NMP/100 ml	
<u>Coliformes totales</u>	<0-1-100000 UFC/ml	Laboratorio, relleno sanitario, conteo de placas.
	<2-140000 NMP/100 ml	
<u>Salmonella typhimurium</u>	0-450000 UFC/100 ml	Laboratorio, relleno sanitario
<u>Achromobacter sp.</u>	0-450000 UFC/100 ml	Relleno sanitario
<u>Bacillus sp.</u>	0-450000 UFC/100 ml	Relleno sanitario
Grupos bacterianos como indicadores fecales	Intervalo de valores reportados	Tipo de estudio
<u>Clostridium fallax</u>	0-450000 UFC/100 ml	Relleno sanitario
<u>Corynebacterium sp.</u>	0-450000 UFC/100 ml	Relleno sanitario, conteo de placas.
<u>Aeromonas sp.</u>	0-450000 UFC/100 ml	Relleno sanitario, conteo de placas.
<u>Listeria monocytogens</u>	0-450000 UFC/100 ml	Conteo de placas.
<u>Micrococos sp.</u>	0-450000 UFC/100 ml	Conteo de placas.
<u>Moraxella sp.; Neisseria sp.</u>	0-450000 UFC/100 ml	Conteo de placas.
<u>Serratia marcescens</u>	0-450000 UFC/100 ml	Conteo de placas.
<u>Acinetobacter sp.</u>	0-450000 UFC/100 ml	Relleno sanitario, conteo de placas.
<u>Enterobacter cloacal</u>	0-450000 UFC/100 ml	Conteo de placas.
<u>Stapylococus albus</u>	0-450000 UFC/100 ml	Conteo de placas.
<u>Pseudomonas sp.</u>	0-450000 UFC/100 ml	Conteo de placas.
<u>Flavobacterium sp.</u>	0-450000 UFC/100 ml	Relleno sanitario
<u>Lactobacillus sp.</u>	0-450000 UFC/100 ml	Relleno sanitario
<u>Sarcina sp.</u>	0-450000 UFC/100 ml	Relleno sanitario
<u>Propionibacterium sp.</u>	0-450000 UFC/100 ml	Relleno sanitario

(*) UFC: Unidades formadoras de colonias.

(**) NMP: Número más probable de coliformes.

A continuación, el cuadro No. 6 presenta un rango de variación de los parámetros de lixiviación:



Cuadro No. 6: Variación de los Parámetros de Lixiviación (Tchobanoglous, 1994)

Constituyente del lixiviado	Valor (mg/L), salvo el pH que es adimensional		
	Relleno Nuevo (<2 años)		Relleno Maduro (>10 años)
	Rango	Típico	
DBO ₅	2000-30000	10000	100-200
Carbono orgánico total	1500-20000	6000	80-160
Demanda química de oxígeno	3000-60000	18000	100-500
Sólidos Suspendidos Totales	200-2000	500	100-400
Nitrógeno Orgánico	100-800	200	80-120
Nitrógeno Amoniacal	100-800	200	20-40
Nitrógeno como Nitrato	5-40	25	5-10
Fósforo Total	5-100	30	5-10
Alcalinidad como CaCO ₃	1000-10000	3000	200-1000
pH	4.5-7.5	6	6.6-7.5
Dureza Total como CaCO ₃	300-10000	3500	200-500
Calcio	200-3000	1000	100-400
Magnesio	50-1500	250	50-200
Potasio	200-1000	300	50-400
Sodio	200-2500	500	100-200
Cloruros	200-3000	500	100-400
Sulfatos	50-1000	300	20-50
Hierro Total	50-1200	60	20-200



CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS.



II.1 Definición y funcionamiento de un estabilizador de suelo aplicado como material impermeable al nivel de desplante de un relleno sanitario.

Un estabilizador de suelo de nombre comercial “*Base Seal*” es un producto ecológico que se emplea en la construcción y mantenimiento de carreteras, aeropuertos, depósitos artificiales de agua, caminos vecinales de terracería, entre otros. Este producto es un polímero/enzima, que cohesiona los espacios entre partículas transformando las características del suelo para la construcción de cuerpos impermeables y resistentes, brindando un mayor valor relativo al soporte. Es aplicable en una amplia gama de tipos de suelo, sin embargo, en las zonas donde las condiciones climáticas extremas requieren el uso de sistemas alternos para mejorar la estabilización, contención y mejoramiento del mismo; la aplicación de tecnología polímero - enzima mejora la resistencia, compactación y condiciones de los suelos, superando los estándares establecidos por las normas de construcción en nuestro país.

La calidad del estabilizador es reconocida en el ámbito internacional ya que se encuentra a la vanguardia respecto a otros productos similares. Está avalado por la American Association of State and Highway Transportation Officials (ASSHTO) en su norma vigente en Estados Unidos.

Los suelos finos con una gran cantidad de arcilla son cohesivos cuando están secos, y su estructura se quiebra ante la presencia de agua, perdiendo su capacidad de soporte y transformándose en inadecuados como material constituyente para la construcción de bases de caminos no pavimentados que requieren de mantenimiento permanente, lo que no siempre se puede llevar a cabo. La solución a este problema es la sustitución o la importación de materiales con buenas características de soporte, lo que no siempre es económicamente factible ya que las distancias a los bancos de préstamo, pueden tener una influencia marcada en los costos del proyecto. La estabilización de suelos mediante el estabilizador *Base - Seal* es una técnica diseñada para mejorar las características físicas y mecánicas del suelo, principalmente en lo que respecta a resistencia, a la acción del clima y las cargas dinámicas que transmite el tránsito vehicular.

El producto básico polimérico del estabilizador es una mezcla de una resina a base de agua, no tóxica y segura, así como agentes de dispersión de la resina, un aglutinante de polímero y agentes de encapsulación.

Polímeros: Su nombre se deriva del griego *poli* que significa muchos y de *mero* que significa parte o unidad. El tejido del cuerpo humano, al igual que todo tejido animal o vegetal, la mayor parte de las sustancias constitutivas de la naturaleza orgánica son polímeros. Están formados de moléculas bastante grandes que a su vez están constituidos por grandes cadenas de múltiples de moléculas, sustancia que consiste en grandes moléculas formadas por muchas unidades pequeñas que se repiten, llamadas monómeras. El número de unidades que se repiten en una molécula grande se llama grado de polimerización. Los materiales con un grado elevado de polimerización se denominan altos polímeros. Los grados elevados de entrecruzamiento dan lugar a una estructura compacta tridimensional. El entrecruzamiento es producido normalmente por reacciones químicas.

Enzimas: Estas son moléculas proteínicas que constituyen catalizadores orgánicos, los cuales se definen como las sustancias que originan o aceleran una reacción. Las enzimas son moléculas grandes con diversos arreglos en la configuración superficial, éstos se acoplan a las superficies de diversas moléculas, iniciándose o acelerándose la reacción química.

El estabilizador *Base-Seal*, es un compuesto polímero/enzima de naturaleza orgánica y actúa como catalizador para originar una reacción química en tipos específicos de partículas de suelo. Esto resulta en la repolarización de las partículas de suelo, originando un cambio en la estructura de las partículas del suelo que se compactan de



modo que se produce una reacción de cementación y fusión. La amalgama resultante es un suelo resistente y estable con las siguientes características:

- ✓ Reduce o elimina la necesidad de suelo importado. Permite la utilización de suelo del sitio.
- ✓ Es aplicable en suelos cuyo contenido de finos sea tan bajo como 20%.
- ✓ Disminuye el tiempo de uso de maquinaria.

La aplicación de este método puede generar ahorros de hasta un 50% comparado con otros estabilizadores líquidos, tales como ácido sulfúrico, cloruros, enzimas, cal y cemento.

Se usa como estabilizador para obtener una reducción significativa en el mantenimiento de caminos y costos de reparación. Actúa como catalizador para la cal y el cemento, ahorra costos y aumenta la fuerza agregada, especialmente cuando se utiliza en suelos arenosos o granulares, solamente requiere 20 % de finos que pasen por un tamiz 200 y es muy adaptable a una gran gama de suelos.

Su composición química previene la corrosión del equipo y no plantea ningún peligro a los equipos, no contiene ningún ácido o materiales explosivos. Cumple con todos los requisitos especiales de Occupational Safety and Health Administration (OSHA) y la Environmental Protection Agency (EPA) para el transporte, almacenaje o la disposición de envases.

Polímero/Enzima en las estructuras de suelos. Probablemente lo más importante es que los revestimientos a base de polímero/enzima para tratamientos de suelos mejoran con el tiempo y a diferencia de los revestimientos de membrana rígida, no están sujetos a daños mecánicos. Los suelos adecuadamente preparados para los depósitos proporcionan ventajas notables respecto a otros tipos alternativos de revestimiento.

Los revestimientos de polímero/enzima se utilizan para evitar la invasión de agua superficial a los desechos peligrosos almacenados, la incorporación de líquidos contaminados al agua subterránea y para la retención de agua en depósitos.

El estabilizador **Base - Seal** (compuesto polímero/enzima) satisface los estándares del Consejo para el Control de Calidad del Agua Regional de California: Código de Regulaciones de California Título 23, División 3, Capítulo 15 y Orden No. 93-57. También satisface los estándares de EPA para revestimientos secundarios de relleno.

Para la República Mexicana se emplearía con mucho éxito, en los estados donde el tipo de suelo es en su mayor parte arcilloso (Lutitas) o calizo y donde las gravas y arenas (materiales granulares) solamente se obtendrían en los depósitos aluviales o en los causes de los ríos. La aplicación del estabilizador **Base-Seal** reduciría la importación de materiales granulares (acarreos) de gravas y arenas, lo que ahorraría sustancialmente al costo del proyecto del relleno sanitario.

Conjuntamente con los suelos, el estabilizador **Base-Seal**, cal, cemento o ceniza volátil en las proporciones adecuadas permite la compactación de alta densidad en suelos, que de otro modo serían inestables y expansivos. Esto no solamente facilita la compactación sino que reduce los tiempos de maquinaria pesada y evita la futura desintegración superficial, produciendo revestimientos de suelo excepcionalmente estables, así como impermeables. Mediante el suelo apropiado, la sección tratada soportará los ciclos húmedo - seco sin presentar problemas. Sus principales características son las siguientes:

- Es un agente humectante y de repolarización de partículas.
- Incremento de la manejabilidad de los suelos arcillosos.



- Incremento de las densidades de compactación.
- Se intercalan por sí mismos a las partículas de suelo.
- Intervienen en el cerrado de los espacios vacíos para evitar el paso de líquidos a través de la membrana estructural del suelo.

Sus principales aplicaciones son:

- Estructuras de Suelos y Carreteras.
- Cubiertas Protectoras Superiores para Rellenado.
- Lagos y depósitos artificiales de agua.

Las ventajas de utilizar el estabilizador *Base-Seal* son las siguientes:

Reducción del índice de plasticidad: Los materiales coloidales son limitados y durante la acción de la cementación, crean partículas más grandes que contribuyen a la reducción del índice de plasticidad. Que mientras más alto sea el índice de plasticidad se requerirá de más cal, cemento, o ceniza volátil, los cuales substituyen al calcio que se necesita para aglomerar y reaccionan químicamente con la arcilla en el suelo para reducir sus índices de plasticidad a los niveles deseados de 65 a 0.

Densidad: Debido a que estos compuestos proporcionan altas tasas de Valor Relativo al Soporte (VRS) usado para determinar la fuerza del suelo a la compresión sin aditivos, para saber cuánta fuerza del suelo tenemos y que otro comportamiento crítico puede ser afectado por la adición de aditivos.

En donde la densidad de compactación es mayor al 95 % la base de una carretera o terracería tendría las siguientes características:

- Una expectativa de vida útil mayor, con pocos o nulos baches.
- Reduce los costos de mantenimiento.
- Ayudan a que las superficies de desgaste tengan mayor duración.
- Prolongan la duración de las carreteras secundarias, caminos provisionales, pistas y avenidas de aeropuertos, plataformas de desembarque, carreteras de uso, vertederos, estanques, cisternas, etc.

Densidad + Fusión: A diferencia de los productos inorgánicos o a partir del petróleo que temporalmente mantienen unidos los materiales del suelo, los compuestos del estabilizador *Base Seal* fusionan las partículas de suelo para originar una reacción de cimentación de alta densidad, resultando en una estructura con las siguientes características:

- Resiste a la penetración del agua y el ascenso capilar.
- No presenta modificaciones por congelación.
- Permanece relativamente termoplástico y no frágil.
- Resiste la vibración y daños por tránsito.

Reducción del coeficiente de permeabilidad: 10^{-7} a 10^{-9} cm. /seg.

Los estudios científicos independientes revelan que cuando el estabilizador *Base - Seal* alcanza su máxima viscosidad, el resultado es un gel que se polimeriza. Esto genera un enlace fuerte a la base, tiene una acción impermeable, nula acción capilar y bloquean la filtración, además de no ser biodegradable.



Para la construcción de la base utilizando materiales de banco, un agregado sucio de bajo costo podrá funcionar mejor con el sistema de aplicación del estabilizador *Base Seal*. Los finos sucios se requieren para unir el material y éstas son partículas de suelo que pasan la malla No. 200 y partículas mayores de 15 a 20 micras.

El sistema de estabilización *Base - Seal* se puede aplicar en un amplio intervalo de condiciones ambientales y de tipo de suelo. Desde climas fríos casi de congelación, hasta extremadamente calientes; lluvioso, hasta seco desértico. Los tipos de suelo pueden variar, siempre y cuando se tenga cierta forma de arcilla para reaccionar con el biocatalizador en los compuestos.

Frecuentemente se utiliza una capa sencilla de suelo local para recubrir la parte superior de la cubierta tratada, de modo que se evite la erosión y otros posibles daños. Esta capa superficial sin lograr una compactación total, para permitir que el crecimiento de la hierba recubra y mantenga la apariencia y estructura de todo el sistema de cubierta. Una capa de 15 cm. de suelo absorberá cerca de 5 cm. de lluvia, sin que se presente el drenado antes de que el agua alcance la capa compactada y tratada. Generalmente, la cubierta intermedia tratada se localiza bajo la cubierta suelta para considerar cualquier vaciado potencial. Para el monitoreo del proyecto, se puede implementar un monitoreo de baja tecnología a los sistemas de detección avanzados.

Otros ahorros

- Reducción en el consumo de agua
- Eliminación de la necesidad de importar agregados
- Reducción de la mano de obra para instalación y del tiempo de maquinaria

Proporciones de dilución para el estabilizador *BASE - SEAL*:

Como se hace con los suelos granulares, el estabilizador *Base - Seal* se mezcla con agua en relación de una parte de estabilizador a 30 partes de agua y en cantidad necesaria para alcanzar 3% sobre el “Contenido Óptimo de Humedad” o en la misma proporción de **1.41 Lt. a 1.76 Lt. / m³**.

Es necesario en todos los casos de prueba obtener la misma densidad 98% Proctor, así como el mismo procedimiento de cura, es importante obtener entre 180 y 200 psi en la prueba de “Dureza Compresiva Ilimitada”.

Las muestras de mezcla pueden requerir variaciones de proporciones de estabilizador en relación con el agua. Esto deberá ser determinado por un estudio en laboratorio de mecánica de suelos, y deberá estar diseñado para una terracería expuesta, donde no se le aplicará sello o asfalto.

Se requieren en promedio de **1.41 Lt.** de estabilizador diluidos en 42.3 litros de agua, obteniendo como resultado 43.71 Lt. de solución que se deberán aplicar a 1.00 m³ de suelo, si el espesor de la base es de 20 cm., esto indicaría que se cubrirían 5 m² con 43.71 litros que es igual a 8.742 Lt. de solución por metro cuadrado en 2 o 3 riegos o aplicaciones.

ESTABILIZADOR Y COMPACTADOR DE SUELOS.

Modo de empleo: El estabilizador *Base - Seal* se diluye simplemente en el camión o pipa de agua y se aplica como riego del material a compactar. Esto asegura una distribución uniforme para máxima eficiencia, además contiene un agente adhesivo revolucionario que permite un enlace cohesivo con las partículas del suelo. Esperar de 24 a 72 horas como tiempo de curado para obtener una máxima cohesión y cementación.



Para su aplicación se recomienda el siguiente procedimiento: escarifique 15 cm. del camino existente y / o tienda con una motoconformadora el material que conformara la nueva base a 7.5 cm de elevación, siga con un camión de agua hasta alcanzar el nivel óptimo de humedad, posteriormente riegue la cantidad apropiada del estabilizador *Base - Seal* diluido en agua; se debe tomar una muestra del material de la elevación para ver si ha alcanzado el contenido de humedad óptima. La muestra debe formar una bola firmemente condensada en sus manos. Después de que a cada capa se le aplique y se mezcle a conciencia el estabilizador y el agua, comience a compactar con un rodillo neumático. Las características propias del estabilizador mantienen el material más pesado distribuido uniformemente a través de la base y evita que rebase a la superficie. Los pasos adicionales del embalador formaran un enlace permanente y compacto.

El estabilizador de suelo *Base - Seal* hace la gran diferencia entre un camino o superficie buena y una mala, es un estabilizador líquido que endurece y sella firmemente las sub base de los caminos, carreteras, autopistas, terraplenes, etc.,

Cuando una carretera por ejemplo, se estabiliza y compacta con *Base - Seal*, la carpeta asfáltica y las otras secciones duran un periodo substancialmente más largo, los costos de mantenimiento se reducen considerablemente y los fondos para construcción se pueden utilizar en otros proyectos que favorezcan el cuidado del medio ambiente.

El estabilizador *Base - Seal* no solamente reduce la necesidad de costosas y constantes reparaciones, sino que ha comprobado ser un excelente producto para las exigencias de los próximos años, porque no tiene impacto ambiental, es económico y de fácil aplicación.

ASPECTOS DE LA ESTABILIZACION DE SUELOS

Parámetros de modificación relacionando el uso del estabilizador *Base-Seal* y varias combinaciones de puzolanas.

Muchas carreteras flexibles varían en la composición del suelo, el cual tiene diferentes características y diferentes propiedades físicas y químicas. Asimismo, varían en elevación (espesor).

Debido a las variaciones señaladas, es que se toman muestras de las secciones de carretera, proyecto o del terreno que se trate y se llevan a cabo estudios de laboratorio para determinar con qué tipo de suelo se va a trabajar. Posteriormente, se pueden hacer muestras de mezcla (o modelos), usando el estabilizador *Base-Seal*, en combinación con uno de los aditivos basado en calcio, tal como cemento Portland, ceniza volátil y cal; los cuales, todos tienen óxido de calcio en varias proporciones.

Para materiales granulares, como gravilla y/o pavimentos de asfalto reacondicionado, se debe usar cemento Portland y estabilizador *Base - Seal* diluido con una solución de agua. En lugar de cemento también se puede usar ceniza volátil, o polvo de cemento calcinado.

Para suelos semi-cohesivos y cohesivos, normalmente se puede usar cal y/o ceniza volátil (fly-ash) en combinación con estabilizador *Base - Seal* diluido en agua.

En determinado momento es necesario recurrir al laboratorio de mecánica suelos para identificar las propiedades del suelo así como la conducta de sus características. En este momento, podemos empezar a determinar que clase y cantidad de químicos secos, como: cemento, cal o ceniza volátil se deben usar. Esta prueba es conocida como "Límites de Atterberg", la cual, cuando es llevada a cabo en muestras de suelo, puede definir los límites líquidos y plásticos, así como el Índice de Plasticidad de los suelos.



Mezcla de muestras: El mecanismo adecuado para mejorar un suelo por inyección química es elaborar muestras en laboratorio. Esto se hace mezclando, cal, cemento o ceniza volátil y estabilizador *Base - Seal* diluido con agua en varias proporciones, por peso y volumen. La prueba empieza usando una muestra estándar de suelo y haciendo un estudio de humedad/densidad, el cual es conocido como prueba Proctor. Es importante alcanzar el “Contenido Optimo de Humedad” y así tener una idea de la densidad máxima del suelo de la zona a tratar o el banco de préstamo, por compactación mecánica. Esta es la “Prueba Proctor Standard” y, en muchos casos, usamos de 96 a 98% de densidad estándar Proctor en los suelos que se están estudiando en el laboratorio, la cual deberá ser también la densidad objetivo para el proyecto de la obra.

Una muestra (sólo de suelo) testigo de control, sin aditivos, deberá ser usada para determinar su dureza o valor relativo al soporte y la conducta crítica del suelo al momento de añadir materiales tales como puzolanas y soluciones de estabilizador *Base - Seal* para mejorar o modificar un suelo, de modo que se convierta impermeable y se le añada flexibilidad y dureza, como una “viga”, para soportar carga pesada en cualquier tipo de condiciones atmosféricas. Como condición el suelo motivo de trabajo deberá tener cuando menos 20% de finos, preferentemente de arcilla o limo de 2 micras. Los experimentos de mezcla se usan para encontrar la mejor combinación de los agentes deseados y soluciones de *Base - Seal*, a fin de alcanzar un objetivo relacionado a la dureza y, más importante, relacionado a la flexibilidad. Posteriormente, también podemos determinar los factores económicos como resultado del uso de este estabilizador.

Desde el punto de vista económico, podría cuestionarse el por qué no tratar suelos únicamente con cal o cemento, pero aquí una explicación a ello: el agua es uno de los peores enemigos de las carreteras y de cualquier otro tipo de superficie de rodamiento o de contención, por tal motivo provoca grietas y deformaciones. Si se utilizan sólo los aditivos estándar (como muchos ingenieros lo hacen) en las tres clases de suelos antes mencionados, y sin usar el estabilizador *Base - Seal* para alcanzar la flexibilidad y dureza deseadas, o capas de soporte de carga para tránsito y vehículos pesados, la carretera o superficie después de algunos años presentará grietas y posteriormente en un tiempo reducido deformaciones. Esto permitirá que el agua penetre por las grietas de la carretera y llegue a las capas bajas, empezando a deteriorar rápidamente la estructura del suelo. A grandes costos se hacen intentos, que casi siempre son poco eficientes para sellar las grietas, de modo que no se necesiten parches o reparaciones. Estas grietas siempre se reflejarán a través de cualquier capa nueva, todo lo cual se puede prevenir simplemente usando la mezcla correcta con aditivos estándar y la solución de este estabilizador, instalados propiamente en la obra con la maquinaria adecuada.

El estabilizador *Base - Seal* con aditivos estándar provee el módulo de flexibilidad y elasticidad deseado, de modo que la nueva superficie tendrá la suficiente dureza y no se agrietará. Asimismo, su expectativa de vida se incrementará (normalmente será de 15 a 20 años) y los costos de mantenimiento serán bajos.

Construcción: Usando el procedimiento adecuado para los materiales mencionados, cada superficie deberá ser evaluada y posteriormente diseñada, teniendo como base las cargas de tránsito, clases de suelo y consideraciones de drenaje. Mezclar cuidadosamente los materiales referidos con un buen pulverizador / mezclador de suelo, como un RACO-250, que tiene un sistema aditivo computarizado en el que la solución del estabilizador es inyectada en forma precisa y consistente durante el mezclado del suelo y el polvo seco. (Este procedimiento es empleado en Estados Unidos). El pulverizador / mezclador es conectado a un camión - tanque que contiene la solución del estabilizador y agua. El estabilizador mezclado con agua puede variar de 247 ml a 370 ml / m². A medida que el pulverizador / mezclador avanza. Normalmente se hace un corte de 15 a 20 cm de profundidad en el suelo. Al mismo tiempo, la máquina empuja un camión-tanque y simultáneamente bombea la solución del estabilizador con agua en forma precisa y uniforme dentro de la cámara de mezcla de suelo de la maquina.



Compactación: Inmediatamente, después del tendido y la fase de mezcla del suelo, compactar a 98% de la prueba Proctor, usando un cilindro compactador de 10 toneladas de vibración suave para suelos granulares; un compactador vibratorio de pata de cabra de 10 toneladas para suelos cohesivos y una aplanadora neumática de 15 toneladas para el acabado final y la prueba de rodamiento. El “Contenido de Humedad Óptima” es muy importante y la densidad requerida se puede lograr a sólo más o menos del 2% del “Contenido Óptimo de Humedad”. Normalmente, la densidad requerida es de 96% a 98% del Standard Proctor para los materiales impregnados de estabilizador, y nada menos de ese rango debe ser aceptable. Esto quiere decir que la prueba Proctor se debe efectuar en el laboratorio para determinar la curva de humedad-densidad requerida y luego ser usada en la obra, como un porcentaje obtenido en el laboratorio, con el propósito de vigilar el control de calidad.

APLICACIÓN DEL ESTABILIZADOR EN CARRETERAS.

Desarrollado y demostrado a través de años de prueba y aplicación en campo, el sistema de estabilización con *Base - Seal* proporciona ventajas adicionales para los constructores de carreteras, a las comunidades y la ecología, ya que no es tóxico y es ambientalmente seguro.

El estabilizador de suelos *Base - Seal* genera una base bastante fuerte para el asfalto y las superficies de concreto. Cuando se estabiliza con *Base - Seal* se puede ocupar una capa menos costosa como sello superficial, en lugar de un asfalto costoso, lo cual ha llegado a producir ahorros de hasta un 80%.

El estabilizador de suelos *Base - Seal* ha sido aprobado para el uso en los Estados Unidos por la oficina de manejo de desechos Sólidos y Peligrosos del departamento de Salud y Control Ambiental y por la oficina de Protección Ambiental, ambos organismos del Gobierno Federal.

En el cuadro número 7 se muestra una comparativa de construcción de carretera por su método convencional y con el procedimiento de estabilización *Base – Seal*.

Cuadro No. 7. Construcción de carretera con estabilizador de suelos *Base – Seal* comparada con los materiales y métodos convencionales

BASE-SEAL	CONVENCIONAL
1.-Limpieza del sitio. 2.-Nivelación y pulverización cuando se requiere. 3.-Nivelación de la superficie de la carretera a la profundidad requerida. 4.-Roto mezclado del Base Seal (y de cualquier aditivo) con el suelo. 5.-Compactación y prueba de densidad. 6.-Sello de gravilla. 7.-Dos o Tres pulgadas de material asfáltico para la superficie de desgaste.	1.-Limpieza del sitio. 2.-Nivelación y remoción del suelo. 3.-Nivelación superficial para excavación. 4.-Remoción de material excavado del lecho de la carretera y remolque del mismo. 5.-Compactación del suelo sobrante. 6.-Prueba de densidad de las guías de basada. 7.-Importación de materiales de relleno seleccionados. 8.-Colocación de los materiales seleccionados. 9.-Nivelación de los materiales seleccionados. 10.-Prueba de cada material de relleno seleccionado (debe ensayarse cada nivel). 11.-Compactación de cada nivel de materiales de relleno seleccionado. 12.- Prueba de Densidad de compactación. 13.-Rociado de emulsión. 14.-7.5 cm de base asfáltica.



En el cuadro número 8 se muestra la clasificación de tipos de suelo de acuerdo a la American Association of State and Highway Transportation Officials (ASSHTO) donde recomienda en qué tipo de suelos es recomendable utilizar el estabilizador *Base – Seal*, así como sus posibles combinaciones con otros materiales.

Cuadro No. 8. Grupo AASHTO.

Simbolo de Grupo Unificado	GW	GP	GM	GC	SW	SP	SM	SC	ML	CL	OL	MH	CH	OH	Pt
Clasificación de Grupo AASHTO	A-1-a	A-1-a	A-1-b	A-1-b	A-1-b	A-1-b o A-3	A-2-4 o A-2-5	A-2-6 o A-2-7	A-4	A-6	A-4	A-5	A-7-6	A-7-5	A-8
Descripción	Grava y Grava-Arena, Mezclas bien conformadas, con menos o sin finos	Grava y Grava-Arena, Mezclas mal conformadas, con menos o sin finos	Grava Pantanosa, Mezcla de Grava-Arena-Pantano	Grava Arcilla, Mezclas de Grava-Arena-Arcilla	Arena y Arena-Grava bien Conformada, con menos o sin finos	Arena y Arena- Grava, mal conformada, con menos o sin finos	Arena Pantanosa, Mezcla de Arena-Pantanosa	Arena Arcilla, Mezcla de Arena-Arcilla	Pantano Inorgánico, Arenas bien finas, Pierda Arenosa, Pantano o Arenas finas de Arcilla	Arcillas Inorgánicas de baja a media plasticidad, Arcillas Gravas, Arcillas Arenas, Arcilla Pantanosa y Arcilla demasiado Fina.	Pantano Orgánicas y Arcilla Pantanosa Orgánica de baja plasticidad	Pantano Inorgánica, Micaminosa de Arenas Finas de Diatominosa o Pantanosa, Pantanosa	Arcilla orgánica de alta plasticidad, arcillas gruesas	Arcilla orgánica de media o alta plasticidad	Turba, lodo y otras tierras orgánicas
Aditivos Recomendables	<p style="text-align: center;"> BASE-SEAL® Un estabilizador Líquido Cemento Portland (o) Asfalto (o) Cal Cal o Cal con Cemento Cemento Portland (Tambien) Cal-ceniza volatil o Cemento-ceniza volatil (Tambien) Cloruros Cloruros Cal </p>														



II.2 Análisis del estabilizador y posibles reacciones con los lixiviados.

El estabilizador de suelos *Base - Seal* es un catalizador polimérico de cadena acíclica lineal con una composición patentada, sus componentes de varios pesos moleculares, actúan sobre los iones libres del suelo para formar polímeros. Su principal función es ligar fuertemente las estructuras micro cristalinas y estabilizar las propiedades higroscópicas de los suelos. Puede emplearse en tratamientos mixtos con cemento o con cal, dependiendo del tipo de suelo a estabilizar. La emulsión de polímeros consiste en copolímeros de diferente peso molecular en una base con metacrilatos, acrilatos, acrilamidas y acrilato de sodio con al menos el 55% de sólidos.

Las moléculas resultantes forman estructuras reticulares fuertemente entrelazadas entre sí, constituyendo un ligante adecuado para todo tipo de suelos exceptuando las turbas. Cuando la solución se mezcla con el suelo, el polímero recubre la superficie de las partículas, facilitando la compactación que precisa de menor cantidad de agua. Constituye un adhesivo que mantiene unidas las partículas y estabilizando el intercambio iónico con el agua (actúa sobre los puentes de hidrogeno), manteniendo de esta forma estabilizada la propiedad higroscópica del suelo.

Necesita de dos a tres días de curado, sin embargo, puede restablecerse el tránsito a las cuatro horas de terminada la aplicación y estabilización, obteniéndose una superficie de la capa de suelo impermeable y resistente. No dañan el medio ambiente y una vez curado no se reemulsifican.

Consideraciones del estabilizador.

- ✓ Reducción del Índice de Plasticidad: Los materiales coloidales se aglutinan y forman partículas más grandes y más densas.
- ✓ Reducción del coeficiente de permeabilidad: Debido al incremento de la densidad el paso del agua se restringe.
- ✓ Incremento del valor relativo de soporte: Con la compactación se crea mayor resistencia y soporte para las condiciones de tráfico vehicular.

Desde el punto de vista de calidad, los lixiviados presentan altas cargas de DQO y COT; es decir, cantidades considerables de materia orgánica y sustancias inorgánicas que tienen gran variabilidad. Entre dichas sustancias se encuentran metales pesados (con su potencial efecto sobre el ecosistema acuático), alto contenido de sólidos totales y disueltos, presencia de nitrógeno en su forma amoniacal, alta concentración de cloruros, compuestos orgánicos diversos, así como gran variabilidad de pH. Lo anterior, depende de la naturaleza de los desechos (pH, edad, temperatura) y de la fase de estabilización en que se encuentre¹⁹.

Como ya se ha mencionado anteriormente, los lixiviados pueden definirse como la producción de líquidos percolados, que se deben principalmente al paso del agua a través de los estratos de residuos sólidos que se hallan en plena fase de descomposición, arrastrando a su paso componentes disueltos, en suspensión, fijos o volátiles²⁰.

Los lixiviados eventualmente pueden ser removidos del relleno sanitario para tratarlos por métodos fisicoquímicos y biológicos y así evitar la contaminación de acuíferos y de las aguas superficiales. Para analizar e interpretar los resultados de eficiencia de cada proceso de tratamiento de lixiviados, se requiere un conocimiento

¹⁹ Borzacconi *et al.* 1996a, El-Fadel *et al.* 2002

²⁰ Vigil, 1993; citado por Centeno, 1996



básico de los mecanismos involucrados en la remoción de fracciones de compuestos orgánicos específicos y metales.

Las opciones de tratamiento incluyen la reutilización de los lixiviados para mantener el contenido de humedad de los rellenos, el tratamiento en el sitio (aerobio, anaerobio o fisicoquímico), la descarga a plantas de tratamiento municipales, o una combinación de las anteriores (Tchobanoglous, *et al.*, 1998).

Se han realizado numerosas pruebas de tratamiento de lixiviados con polímeros y/o enzimas, tanto de origen natural como sintéticos, pero en ninguno de los casos se han obtenido resultados satisfactorios.

Dicho lo anterior, y considerando las posibles reacciones físicas y químicas del estabilizador con los lixiviados, se tendrán que realizar pruebas en laboratorio para determinar las reacciones que podrían generarse, así como los beneficios o limitantes que puede resultar al estabilizar un suelo con este tipo de polímero. Si bien es cierto que este procedimiento de estabilización es aplicado en campo, no se descarta la posibilidad de que también se pueda aplicar en el tratamiento de lixiviados.



II.3 Pruebas de laboratorio para determinar la resistencia y permeabilidad del material mejorado con el estabilizador.

Como se ha mencionado en el capítulo anterior, el estabilizador de suelo resulta ser una herramienta valiosa para el mejoramiento de suelos reduciendo los costos de los procedimientos constructivos como en el mantenimiento que se requiera. El estabilizador de suelos *Base – Seal* se emplea en:

- ❖ Firmes sin asfalto (caminos de aspecto natural).
- ❖ Reciclado de firmes deteriorados.
- ❖ Formación de explanadas.
- ❖ Formación de sub bases y bases en carreteras asfaltadas, control de erosión y polvo.
- ❖ Riegos de curado, adherencia e imprimación.

Los productos reaccionan al contacto con el suelo formando estructuras reticulares de cadena larga. Ello confiere tres propiedades fundamentales a la mezcla resultante:

- Capacidad portante
- Flexibilidad
- Reducción de la permeabilidad

La maquinaria que se requiere para la conformación de un terraplén para un camino, carretera o superficie de rodamiento es la siguiente:

- Recicladora, motoniveladora, rodillo vibrante pesado y camión cisterna.
- Ripper o escarificador, rotovator o trituradora, motoniveladora, rodillo vibrante y camión cisterna

Los ahorros que se obtienen al emplear este tipo de procedimientos constructivos son los siguientes:

- ✓ Aprovechamiento de materiales locales sin necesidad de emplear materiales de préstamo seleccionados.
- ✓ Eliminación de los transportes a vertedero de materiales excavados.
- ✓ Posibilidad de reducir notablemente el grosor de las capas asfálticas.
- ✓ Velocidad de construcción (hasta un 50%).
- ✓ La formación de una base adecuada permite controlar el gasto en mantenimiento durante la vida útil de la vía.

Para la construcción de un relleno sanitario se requiere de diversos estudios de mecánica de suelos para determinar el tipo de suelo donde se va a desplantar el primer cuerpo de residuos sólidos, así como un conjunto de propiedades que debe de cumplir para estar dentro de norma.

A continuación se describen las pruebas de laboratorio que en la metodología se determinaron realizar para conocer el tipo de suelo que se va a ensayar y posteriormente comprobar el funcionamiento del estabilizador al ser aplicado.

LÍMITES DE CONSISTENCIA (DE ATTERBERG)

LÍMITE LÍQUIDO.

Objetivo: Conocer las características de plasticidad que presentan los materiales, que son cribados por la malla No. 40 de acuerdo con esto clasificarlos por medio de la carta de plasticidad y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.)

Equipo: Copa de Casagrande, malla No. 40, cápsula de porcelana, espátula de abanico, espátula de cuchillo, balanza con aproximación de 0.1 gr., ranurador plano y curvo, cápsulas de aluminio, horno con temperatura controlable de entre 105-110° C., rociador, desecador, cucharón, acrílico y charola.



Procedimiento: Calibrar la copa de Casagrande ayudados por la parte posterior del ranurador, para que tenga una altura de caída de 1.0 cm. en el centro. Cribar por la malla No. 40 de 300 a 500 grs. de material seco, colocarlos en la cápsula de porcelana agregando agua y homogenizando hasta formar una masa pastosa (no una suspensión).

Colocar este material en la copa ayudados por la espátula en cantidad ligeramente excedida, para que al ser extendido se tenga en el centro un espesor de aproximadamente 1.0 cm. (solo se coloca material en mitad de la copa).

Dividir el material en dos partes con el ranurador adecuado (plano para suelos cohesivos, curvo para suelos friccionantes)

El ranurador tiene una altura de 0.8 cm. por tanto no debe jalar material si este tiene un espesor de 1.0 cm.

Accionar la manivela y hacer caer la copa a razón de 2 golpes por segundo y contar el número de golpes a los cuales se logra una liga de los bordes interiores de la ranura, en una longitud de aproximadamente 1.0 cm. (Se recomienda que este primer punto cierre entre 30 y 40 golpes). Pesar una de las cápsulas de aluminio, anotar su peso y colocar una porción de material del lugar donde se unieron los taludes, pesar la cápsula con la muestra húmeda y anotar (**w.c. + s.h.**). Meterla en el horno de 18 a 24 horas hasta la pérdida total de la humedad, sacarla y pesar la cápsula con la muestra seca (**w.c. + s.s.**).

Por diferencia de pesos obtener el contenido de humedad. Se deberá agregar un poco más de agua al material y se repite el proceso, se recomienda realizar 4 puntos para poder definir la curva de fluidez del material, los cuales

deberán quedar comprendidos entre 30-40,20-30,10-20,7-10 golpes si se quiere efectuar la prueba con un solo golpe, se debe buscar que la muestra cierre entre 20 y 30 golpes y aplicar la siguiente expresión.

$$l.l. = w_n \left(\frac{n}{25} \right)^{0.12}$$

Donde:

l.l.- límite líquido

Wn.- contenido de humedad a un determinado número de golpes (al que cerró el talud)

n.- número de golpes a los cuales cierra la muestra (entre 20 y 30)

0.12.- pendiente de la tangente de la curva de fluidez.

Para el primer caso, se graficarán como ordenadas los contenidos de agua (w) y como abscisas el número de golpes a los cuales cerro el talud, se unen los puntos y la unión de estos nos proporciona la curva de fluidez del material. En donde dicha recta cruce con 25 golpes se trazara una línea hacia el eje de las ordenadas donde obtendremos una humedad y ésta será el límite líquido del suelo en estudio.

Posibles errores: Desajuste en la altura de caída, mayor cantidad de material al indicado, burbujas de aire en el material, defectos de pesada, mala aplicación de la velocidad de los golpes, no limpiar la copa y el ranurador después de cada ensaye.

LÍMITE PLÁSTICO

Objetivo: Observar el cambio del material de un estado semilíquido a uno semisólido y con esto obtener su límite plástico, para con este dato y el del límite líquido calcular el índice plástico de los suelos, para realizar su clasificación de acuerdo con el S.U.C.S.

Equipo: Además del utilizado en el límite líquido, una placa de vidrio o acrílico, dos cápsulas de aluminio.



Procedimiento: Del material del límite líquido que se unió entre 30 y 40 golpes se toman dos porciones de aproximadamente 1.0 cm. de diámetro, las cuales se rolarán por el acrílico para que pierdan agua, hasta que

tengan una longitud de 10.0 cm y un diámetro de aproximadamente 0.3 cm, si alcanza estas características y no se rompe en varias fracciones es indicio de que su humedad es superior al límite plástico, debiéndose repetir el proceso al romperse el filamento en varios segmentos, se toma todas las porciones y se realiza la determinación de su contenido de humedad. Se saca el promedio de ambos contenidos y se reporta como límite plástico este resultado.

Posibles errores: Defectos de pesada, agregar material seco al ya homogenizado, que no se tomen todas las fracciones del filamento al pesarse, que se rompa antes de lograr el diámetro de 0.3 cm.

Otras fórmulas empleadas serían las siguientes:

Para calcular el índice plástico:

i.p. = límite líquido – límite plástico o para calcular el i.p.

Si el material no presenta límite plástico: I.p. = 0.73 (límite líquido - 20)

GRANULOMETRÍA

Objetivo: Determinar la composición de tamaños, mediante el paso del material por una serie de mallas con aberturas determinadas, pasando primero por las de mayor abertura, hasta llegar a las más cerradas, con el retenido por malla se calcula el porcentaje con respecto al total y se grafica su curva granulométrica.

Equipo: Juego de mallas de diferentes aberturas: 3", 2", 1 1/2", 1 1/4", 1", 3/4", 1/2", 3/8", 1/4", N° 4, 10, 20, 40, 60, 100, 200, charola fondo, horno balanza con capacidad de 20 Kg. y aproximación de 0.1 gramos, vaso de aluminio de 500 cm³, agitador, varilla metálica 1/4"Ø y 20 cm. de longitud, cucharón, charolas y brocha.



Procedimiento: Se realiza un cuarteo con la muestra, se toman los cuartos opuestos y se toma una muestra representativa de 3.0 Kg. Separar la grava de la arena con finos, vaciando poco a poco y cuidadosamente el material por la malla No. 4 y sin sobrepasar la capacidad de la malla.



Se pesa la porción que pasa la malla n°4 y se anota como (W_{sf}) y también el retenido en dicha malla se pesa y anota (W_g).

Del material seco que pasó la malla número 4 se separan aproximadamente 500 gr., los cuales se reducen hasta 200 gr., se colocan en el vaso de 500 cm³, con agua y se agita en forma de ochos con la varilla, vertiéndose sobre la malla número 200, aplicar un chorro de agua hasta que el agua salga limpia, se regresa el material retenido en la malla número 200 al vaso y se seca hasta peso constante y se anota como (W_f).

Las mallas se ensamblan en orden descendente, separando las gravas y arenas.

Se colocan las Cribas en el Ro-Tap con el suelo 5 minutos. Para gravas se retiran y se pesa el retenido en cada malla; para las arenas se dejaron 8.0 minutos.

Las partículas que hayan quedado atoradas en la retícula, forman parte del material retenido de la criba correspondiente, por lo que se regresara cepillado las mallas al revés.

Para comprobar que el cribado se haya ejecutado en forma correcta, deben separarse las mallas y manejarlas en forma individual, colocando una charola y una tapa bien ajustada se balancea con rapidez de un lado a otro, aplicando golpes ligeros con la mano no debiendo pasar más del 1% a través de cualquier malla, en caso contrario se repetirá la prueba.

Se calcula el porcentaje retenido con la siguiente expresión:

$$\% RET = \frac{W_{retenido_{malla}} \times 100}{W_{Total}}$$

Ya realizados los cálculos se grafica y reporta el porcentaje retenido acumulado de cada malla. El C_u y el C_c con las siguientes fórmulas:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10})(D_{60})}$$

Considerar que de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos será:

Grava bien graduada (GW) $C_u > 4$ y C_c entre 1 y 3

Arena bien graduada (SW) $C_u > 6$ y C_c entre 1 y 3

C_u = coeficiente de uniformidad y C_c = coeficiente de curvatura.

Posibles errores:

- Que la muestra no esté totalmente seca.
- Que se tenga equipo sucio o las mallas rotas.
- Pesos mal realizados.
- Cuarteo no representativo.

EQUIVALENTE DE ARENA

Objetivo: Obtener el porcentaje de finos indeseables, principalmente arcillas que se presentan en suelos que pasan la criba N° 4 (4.75mm.), con la finalidad de conocer ciertas características que pueden afectar a las capas que forman el pavimento (sub bases, bases, carpetas asfálticas, losas de concreto hidráulico), esto se logra por sedimentación de las arenas y floculación de los materiales finos.

Equipo: Tres probetas graduadas de 0 - 38cm. (0 - 15.3") con tapón de corcho, embudo, tres cápsulas de aluminio, malla del N° 4 (4.75mm), agitador de probetas, recipiente para solución de trabajo, sifón, tubo irrigador hueco con dos orificios laterales, gabinete, cronometro, pisón con un peso aproximado de 960 gr.



Procedimiento: Tamizar de 500 - 1000gr. por la malla N° 4 de material seco, se cuartea y se toma una muestra representativa, la cual colocaremos por pesos iguales en tres cápsulas (la finalidad es que las tres probetas tengan materiales semejantes en proporción y en representatividad para que los resultados finales no difieran mucho uno del otro, se recomiendan 100 gr. por cápsula).

Agregar en la probeta solución de trabajo hasta la marca de 10 cm. (4"). La solución de trabajo es una mezcla de 90 ml. de solución de reserva y el resto de agua destilada hasta completar un galón, el cual se pone dentro del recipiente de 4 l. Dicha solución ayudará a flocular a los finos; se agrega dentro de la probeta el material de una de las cápsulas ayudados por el embudo para evitar la pérdida de finos. Toda la muestra deberá quedar en contacto con la solución, de ser necesario se le darán unos ligeros golpes en la parte inferior de la probeta para lograr esto. Se deja en reposo durante 10 minutos.

Se coloca el tapón de corcho y se lleva para el agitador, se acomoda la probeta en él y se le aplica este proceso durante 90 ciclos o 45 segundos (Esto se puede hacer manualmente en forma horizontal durante el mismo tiempo y la misma frecuencia). Se saca del agitador y se le quita el tapón de corcho limpiando en la boca de la probeta lo que tenga adherido, se lleva a la solución de trabajo, dejamos que este fluya y con el tubo se le dá un ligero picado al material asentando en la probeta para que los finos no queden atrapados bajo las arenas, se van limpiando las paredes de la probeta con la solución y se recomienda mover el tubo de aluminio en forma helicoidal para formar turbulencias y con esto los finos queden arriba y las arenas se asientan.

Cuando se llegue con el liquido hasta la marca de 38 cm. (15.3") cortar el fluido a la probeta y la solución y la muestra se dejan reposar durante 20 minutos procurando colocar las marcas de la probeta hacia un lugar desde donde se puedan leer fácilmente, se deben evitar lugares con vibraciones pues esto traería alteración de las lecturas.

Pasado este tiempo se lee directamente en las graduaciones de la probeta en que altura se encuentran los materiales finos y esto se anota como lectura de arcilla.

Para tomar la lectura de arena nos ayudaremos del pisón, el cual se introducirá lentamente dentro de la probeta para evitar turbulencias, llegará un momento en que no penetre más ya que la arena no lo dejará, se aplica un pequeño giro al pisón para provocar que la marca del mismo se pegue lo más posible a las marcas de la probeta, siempre se debe procurar no ejercer presión en el pisón. En el sitio de la marca se tomará la lectura aparente de la arena a la cual le restaremos la distancia que se tiene entre la marca y la punta del pisón (24.4 cm. o 10") y así se obtiene la lectura de arena.

El equivalente de arena del material se obtiene con la siguiente expresión:

$$EA = \frac{Lectura_{arena}}{Lectura_{arcilla}} \times 100$$

Se repite el proceso con las dos probetas restantes, si los resultados son semejantes el equivalente de arena del material será el promedio de las tres. Pero si alguna de ellas discrepa significativamente (3 - 5%) este valor se elimina y se toma el promedio de las restantes.

Solución de reserva: Está compuesta de 454 gr. de cloruro de calcio disueltos en 1.9 litros de agua destilada, se enfría la solución y se pasa por papel filtro para después agregarle 47 gr. de formaldehido y 2047 gr. de glicerina bien mezclados todo se diluye en agua destilada hasta completar 3.2 litros de líquido.

COMPACTACIÓN PORTER

Objetivo: Obtener el peso volumétrico seco máximo y la humedad óptima de compactación, cuando al material se le aplica una carga de 140.6 Kg./ cm² en un tiempo de 5 minutos. En suelos que carecen de cementación y que pasan la malla de 2.54 cm. (1"). Esto se efectuará por tanteos, al agregar o disminuir la cantidad de agua de la muestra.

Equipo: Molde con base y extensión de 15.7 cm. y 12.5 cm. de altura aproximadamente, varilla con punta de bala, cápsula de aluminio, malla de 2.54 cm. (1"), probeta de 500 ml., cápsula de aluminio, vernier, guantes de hule, máquina para aplicar carga o presión con capacidad de 30 toneladas, balanza con capacidad de 20 Kg. y otros con aproximación de 1gr., charola cuadrada de 60 x 40cm. y horno con temperatura controlable de entre 105° -110° C.



Procedimiento: Cribar por la malla 1" (2.54 cm.) con 16 Kg. de material seco, el cual se cuarteará en porciones del mismo peso.

Medir el diámetro y altura del cilindro y pesarlo; calcular la carga total que se le aplicará en la máquina en el tiempo de 5 minutos y obtener la carga que se le deberá aplicar por cada minuto. Pesarse la cápsula y anotar su número, registrar ambos.

De la muestra de 16 Kg. colocar cuatro en la charola, rociar agua de manera homogénea la cual se medirá. (La forma de conocer que el material tiene la humedad adecuada o se está cercano a ésta, consiste en tomar con la mano seca o con guante de hule, es tomar una porción de material húmedo y apretarlo fuertemente, si queda un pequeño rocío en la palma de la mano o en el guante es indicio de que está cercana la humedad buscada).

Tomar un testigo de humedad de 80 – 120 gr. de peso, colocarlo en la cápsula, pesarlo y anotar peso de la cápsula con suelo húmedo (**Wch**), el resto de la muestra se coloca en el molde con base y extensión en tres capas y a cada una de éstas se le acomoda con la varilla punta de bala, dando 25 varillados en forma de espiral, comenzando en la orilla y terminando en el centro.



Se coloca en la máquina para aplicar presión, aplicando la carga lentamente, en el tiempo y valor calculados anteriormente. Esto se hace con la finalidad de que el material se acomode poco a poco. Cuando se llega a los 5 minutos y por consecuencia a la carga máxima de 140.6 Kg. /cm² se deberá sostener un minuto más dicha carga, si en este momento saca unas cuantas gotas de agua por la parte inferior del molde (de 3 - 5) es indicio de que se encontró la humedad óptima y por consecuencia su peso volumétrico seco máximo (si las gotas comienzan a aparecer antes de aplicar la carga máxima, indica que nos excedimos de agua. Si por el contrario no se humedece ni la base del molde, es indicio de que faltó humedad, en ambos casos la muestra se desecha y se toma otra porción de 4 Kg. de los restantes 16 Kg. y para el primer caso se reducirá la cantidad de agua y en el otro se incrementará en un porcentaje que varía de 2 - 4% de agua con respecto del peso de la muestra seca más la cantidad agregada anteriormente).

Observadas las gotas de agua, se retira el molde de la máquina se le quita la base y la extensión y se pesa éste con la muestra húmeda; por diferencia se obtiene el peso de esta última y se anota (**Wm**).

Medir la altura faltante que existe entre la parte superior del espécimen y el borde del molde, esto se realiza en una orilla, en el centro y en la orilla opuesta, se obtiene el promedio y a esto le nombraremos altura faltante (**HF**), este valor se lo restamos a la altura del molde y con esto se obtiene la altura del espécimen compacto (**H.e.c.**). Conocida el área del cilindro la multiplicamos por la altura del espécimen y se obtiene el volumen compacto de la muestra (**Vc**) se calcula el peso volumétrico húmedo.

$$\& m = \frac{(W_m)(Kg)}{(V_c)m^3}$$

Sacar la cápsula del horno y pesarla, anotar peso de cápsula con suelo seco (W_s) obtener el contenido de humedad.

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Calcular el peso volumétrico seco máximo de laboratorio.

$$\&_{Max} = \frac{\&_m}{100 + w} \times 100 \therefore \frac{Kg}{m^3}$$

EXPANSIÓN

Objetivo: Conocer el porcentaje que se hincha o expande el material en forma vertical, al encontrarse saturado de agua y con sobrepesos, esto provocado por la reacción química entre las arcillas y el agua, este es un factor de gran importancia en pavimentos para evitar deformaciones, ya que cuando el suelo pierde dicha agua se contrae, provocando fallas funcionales.

Equipo: Mismo de la prueba Porter, dos sobrepesos con un peso aproximado de 360 gr. con forma de dona y de media luna. Placa base perforada con vástago central, dos hojas de papel filtro, triple, micrómetro con aproximación de 0.01 mm., tanque de saturación con un tirante de agua de cuando menos 5 cm. por encima de la muestra.



Procedimiento: Colocar las hojas de papel filtro, una arriba y otra en la parte inferior de la muestra (con esto evitamos la pérdida de finos en el espécimen al entrar en contacto con el agua, ya que éstos son los que pueden provocar la expansión). Armar el molde con base y extensión y colocar sobre la muestra compactada la placa base perforada, (dicho elemento nos servirá para que exista circulación de agua dentro del espécimen, que es como realmente ocurre en el campo) y sobre de ella colocamos los dos sobrepesos, (estos realizarán las veces de las capas superiores que pueden estar sobre la capa analizada).

En el triple colocar el deformímetro y apoyamos las patas del primero sobre los bordes de la extensión del molde, centrar el vástago de la placa y del micrómetro buscando que ambos entren en contacto (esto se conocerá por el

movimiento de la manecilla grande del micrómetro) se aprieta la tuerca de la placa base (con esto evitamos que se mueva el vástago de su posición original) se lleva al tanque de saturación, donde se coloca de tal manera el micrómetro que se puedan tomar lecturas de la misma posición (marcar en qué lugar se encuentran colocadas las patas del triple para repetir esta posición cuando se venga a tomar lecturas) se toma la medida del deformímetro y se anota como lectura inicial.

A las 24 horas se vuelve a leer en el deformímetro y se anota como lectura inicial.

A las 24 horas se vuelve a leer en el micrómetro y se hace lo mismo al tercer día, si es muy semejante esta lectura con la del día anterior esto nos indica que el material ya no se expandió más y este dato lo reportamos como: **lectura final**.

Si a las 72 horas la lectura sigue variando, se deja en el tanque la muestra hasta cinco días y ahí se toma la lectura final cuando éstas no varían demasiado. Pero después de este tiempo, si el material se continúa hinchando, es indicio de que presenta gran cantidad de finos plásticos y por consecuencia no puede emplearse en un pavimento a menos que se realice un tratamiento adecuado.

La expansión se obtiene con la siguiente expresión:

$$\text{Expansión} = \frac{\text{lectura}_{\text{final}} - \text{lectura}_{\text{inicial}}}{\text{Altura}_{\text{especimen}_{\text{compacto}}}} \times 100$$

VALOR RELATIVO DE SOPORTE (V.R.S.)

Objetivo: Obtener la resistencia que presentan los suelos al ser penetrados por un vástago de 19.5 cm. de sección; se obtendrá la carga que soporta el material a cierta profundidad establecidas de antemano (1.27, 2.54, 3.81, 5.07, 7.62, 10.16, 12.7 mm). Con esta prueba de laboratorio se analiza la calidad de los materiales en cuanto a resistencia y se puede definir en qué capa del pavimento puede emplearse.

Equipo: Mismo de la prueba Porter y además, dos sobrepesos de aproximadamente 360g., equipo de penetración en el cual se puedan tomar lecturas cuando menos a cada 10 Kg. micrómetro con aproximación de 0.01mm. y extensión para colocar el deformímetro.





Procedimiento: Sacar el espécimen compactado y saturado del tanque de saturación y colocar en una tarja para que se escurra durante tres minutos en forma horizontal.

Retirar la placa base perforada, dejar los sobrepesos y colocarlos sobre la muestra, llevarla a la máquina de penetración se hace pasar entre las perforaciones de los sobrepesos el vástago de la maquina, este lo bajamos hasta que entre en contacto con el material compacto, esto lo verificaremos aplicándole una carga de 10 Kg. (si tenemos un marco de carga y el micrómetro que mide este valor no lo colocar en ceros, lo que marque el deformímetro se anotará como lectura inicial *li*.) colocar el micrómetro para medir las penetraciones, poniendo su vástago ya sea sobre la base del cilindro o bien sobre los sobrepesos (igual que en el caso anterior podemos colocar el micrómetro en cero o bien anotar la lectura que presente como la lectura inicial y de ahí obtener las penetraciones subsecuentes a las cuales debemos anotar su carga y que son las anotadas arriba).

Se comienza a penetrar el espécimen con una velocidad constante pero de tal manera que al primer minuto se llegue a la profundidad de 1.27 mm., al segundo minuto a 2.54 mm., en el minuto tres a 3.81 mm., en el cuarto min. a 5.08 mm., en el seis a 7.62 mm., en el ocho a 10.16 mm., y la ultima penetración de 12.7 mm., al minuto diez. Para cada una de las profundidades referidas se tomará una lectura de carga y con los valores penetración (ubicada en el eje de las “X” de la grafica) contra carga que ubicaremos en el eje de las “Y”, se obtendrá la curva de calidad del material.

El material emplea unas curvas tipo que son las ideales para cada material, si nuestra gráfica presenta una forma semejante a las curvas ideales del V. R. S. del suelo se obtiene empleando la siguiente expresión.

$$V.R.S. = \frac{C \text{ arg } a_{\text{en penetración}} (mm)}{1360} \times 100$$

Si la gráfica que obtengamos de nuestro suelo, no nos presenta una forma semejante a las curvas tipo ésta se deberá corregir para encontrar su V. R. S. de la siguiente manera:

Si la gráfica inicia con la concavidad hacia arriba, se hace lo siguiente: se traza una tangente en la parte más recta de la gráfica, hasta cortar el eje de las abscisas. En este sitio ubicaremos ahora el inicio o valor cero de las penetraciones y corremos en forma equidistante las penetraciones de 1.27 y 2.54 mm. De esta última llevamos una recta hasta cortar la curva obtenida y donde intercepta trazamos una recta paralela al eje de las “X” hasta llegar al KN. Eje de las ordenadas de donde obtendremos la carga corregida a la penetración de 2.54 mm., que será el dato que se emplea para el obtener el V. R. S. corregido del material.

$$V.R.S. := \frac{C \text{ arg } a_{\text{corregida}} a_{254}(mm.)}{1360} \times 100$$

PESO VOLUMÉTRICO SECO Y SUELTO

Objetivo: Dicho ensaye nos ayuda para tener una idea aproximada de cómo se comportará un suelo al extraerlo de su estado natural, a un estado suelto. Sirve además para poder efectuar las transformaciones de pesos (que es la forma como se trabaja en el laboratorio) a volúmenes de material (es la manera más común de cuantificar los materiales en el campo y en la obra).

Equipo: Molde metálico de aproximadamente 15 cm. de diámetro y 18 cm. de altura con base, balanza con capacidad de 20 Kg. y aproximación de 1.0 gr., escantillón o regla de 30cm., cucharón, brocha, cordel, cápsula de aluminio, horno con temperatura controlable entre 105° y 110° C.



Procedimiento: Medir las dimensiones del molde, calcular su volumen y pesarlo con base y extensión. Tener una cantidad representativa del suelo por analizar de entre 10 a 20 Kg. el cual se cuartea y de él se toman los cuartos opuestos, los cuales se dejan caer dentro del molde ayudados por el cucharón y desde una altura de caída constante (30 cm.) de tal manera que el material se acomode en el cilindro de forma natural, sin ayuda de una fuerza externa (en este caso el material deberá estar seco) llenar el molde hasta que se derrame el material y aquel que sobresalga del molde retirarlo sin ejercer presión ayudados por el cordel, limpiar con la brocha el molde y su base, pesar el molde con el suelo y anotar peso del molde con suelo. Por diferencia calcular el peso del suelo dentro del cilindro el cual dividido entre su volumen nos proporcionará el peso volumétrico seco y suelto del material.

Este proceso se repite de tres a cinco veces y se saca un promedio para obtener el valor más cercano a la realidad.

$$P. V. S. S. = \frac{PESO\ DEL\ SUELO\ EN\ EL\ MOLDE}{VOLUMEN\ DEL\ MOLDE} \quad \frac{Kg.}{m^3}$$

Cuando el material contiene cierta humedad, ésta deberá tomarse en cuenta para los cálculos y entonces se tomará una muestra representativa de material para obtener su contenido de humedad (100 a 200 gr.) y la fórmula sería la siguiente:

$$\&_d = \frac{100(W_{rm} - W_r)}{V(100 + W)} = \frac{100W_m}{V(100 + W)}$$

- W_{rm}** = peso del recipiente con muestra
- W_r** = peso del recipiente
- W_m** = peso de la muestra
- W** = Contenido de humedad

Los errores que más comúnmente llegan a cometerse son:

- Se anoten mal los pesos referidos.
- El vaciado del material varíe en forma significativa.
- La muestra no sea representativa del material que se analiza.
- Que existan las vibraciones en el lugar y modifique el acomodo del suelo.
- Cuando se enrace se aplique una presión y cambie las condiciones de acomodo.



COMPACTACIÓN PROCTOR (AASHTO)

Objetivo: Obtener el peso volumétrico seco máximo de laboratorio y la humedad óptima de compactación de los suelos que pasan la malla No. 4 (4.75 mm) ó que como máximo se retiene el 10% en la criba 3/8", esto por medio de una prueba de tipo dinámico apoyados por un pistón de cierto peso y altura de caída, de acuerdo con la variante que se realice, dicha prueba no debe efectuarse en materiales que carezcan de cementación, como las arenas y los tezontles. Las variantes cambiarán de acuerdo a la energía de compactación (Ee) usada y la granulometría del material.

$$Ee = \frac{(n)(N)(W)(h)}{\text{Volumen}} = \frac{\text{kg} - \text{cm}}{\text{cm}^3} \hat{=} \text{ kilojoules}$$

Ee = Energía específica de compactación Kg. - cm. / cm³.

N = Número de golpes por capa

n = Número de capas (de 3 a 5)

W = Peso del martillo Kg.

h = Altura de caída del martillo cm.

Ee de prueba estándar 6.06 KJ.

Ee de la prueba modificada 27.3 KJ.

Ee de la prueba S.C.T. 7.2 KJ.

TIPO DE PRUEBA	ESTANDAR		MODIFICADA	
Masa del pisón, kg	2.5 ± 0.01		4.54 ± 0.01	
Diámetro del pisón, mm	50.8		50.8	
Altura de caída del pisón, cm	30.5 ± 0.1		45.7 ± 0.1	
Numero de capas	3		5	
VARIANTES	A Y C	BYD	A Y C	BYD
Tamaño máximo del material, mm	4.75 (No. 4)	19.0 (3/4")	4.75 (No. 4)	19.0 (3/4")
Diámetro int. Del molde, mm	101.6 ± 0.4	152.4 ± 0.7	101.6 ± 0.4	152.4 ± 0.7
Numero de golpes por capa	25	56	25	56
Tamaño de la muestra de prueba, Kg	4	7.5	4	7.5

Equipo: Molde con base y extensión de 10 cm. de diámetro y 12 cm. de altura, pisón con guía con un peso de 2.5 Kg. y una altura de caída de 30.5 cm. (4.56 Kg. de peso y una altura de caída de 47 cm., cribas del No. 4 y de 3/8", cápsulas de aluminio, cucharón, desarmador, probeta de 100 ml., enrasador, rociador, balanza con capacidad de 5 Kg. y aproximación de 0.1 de gramo, bases de concreto para compactar, horno con temperatura controlable de entre 105° - 110° C, extractor de muestras, charola cuadrada.

Procedimiento: Tamizar por la malla No. 4 de 2700 a 3000 gr. de material seco (o de 5000 a 5500 gr. para el molde grande) y ponerlo en la charola, tarar y numerar las cápsulas; pesar el molde sin base y extensión, medir su diámetro y altura para calcular su volumen real.

Calcular el volumen aparente aumentándole 1 cm. a la altura del molde; conocido este dato y la energía específica de compactación se calculará el número de golpes por capa que se le aplicarán al material.



Rociar agua en el material (la cual no se medirá) repartiéndola de la manera más uniforme, procurando no quede material seco en las esquinas de la charola de tal manera que al tomar el suelo y apretarlo fuertemente con la mano se forme un grumo que no se desmorone fácilmente es indicio de que la humedad se encuentra de 4 a 6 % por debajo de la óptima de compactación, la cual es la que requerimos conocer.

En caso de que se hayan formado grumos durante la incorporación del agua, se revuelve el material hasta disgregarlo totalmente. Se mezcla cuidadosamente la porción para homogenizarla y se divide en 3 fracciones aproximadamente iguales, en el caso de la prueba estándar y en 5 porciones para la prueba modificada.

Apoyar sobre el bloque de concreto el molde de prueba con su respectiva extensión y se coloca una de las fracciones del material húmedo hasta una altura de 7 cm., con el pistón que corresponda se compactará el material aplicando el número de golpes calculado; procurando que la punta de la guía siempre este apoyada sobre el suelo y que el perímetro exterior del tubo guía siempre esté en contacto con el perímetro interior del cilindro de compactación, de esta forma se cubre toda el área del material contenido en el molde y al mover el martillo en todo el interior del molde se debe procurar que exista un traslape entre un golpe de martillo y el siguiente, el impacto será por caída libre y subiendo el pistón a su máxima altura.

Después de lo anterior se escarifica la capa compactada con el desarmador, para que exista adherencia con la siguiente fracción de material que se colocará sobre ella.

Agregar la siguiente capa de material en el molde hasta una altura de aproximadamente 11 cm. del cilindro, (se repite el procedimiento de compactación y escarificación).

Si el proceso sólo será en 3 capas que es como se está suponiendo, se recomienda que la última capa de material suelto llegue hasta al ras de la extensión para que después de apisonarla quede por encima del cilindro con una altura de 1 a 1.5 cm. (Esta fue la causa de que se aumentara 1 cm. a la altura real, para tomar en cuenta este espesor del material que también consume cierta energía de compactación y que es necesario considerar al calcular el número de golpes por capa).

Nota: El espécimen compacto nunca debe quedar por debajo de la altura del molde, ni se debe agregar material suelto para corregir esta anomalía, pues es un error que se presenta al momento de calcular el volumen del suelo compacto, cuando el material quede por debajo del molde, se extrae y disgrega el material y la prueba se repite.

Después de compactada la última capa se retira con mucho cuidado la extensión del molde para evitar que se rompa el espécimen una vez realizado este paso se procede a enrazar la muestra hasta la altura del molde, limpiar exteriormente el mismo y obtener el peso del molde con el suelo húmedo y por diferencia de pesos obtener el peso del suelo húmedo (W_m) y el cual dividido entre el volumen real del molde nos proporcionará el peso volumétrico húmedo (γ_m).

Se saca el espécimen del cilindro, se corta longitudinalmente y de su parte central se obtiene una muestra representativa (de 100 a 120 gr.) del centro de la muestra, colocarlo en una cápsula pesarlo y anotar su peso con la muestra húmeda, se mete en el horno de 18 a 24 hrs. se saca del mismo y pesándolo obtenemos el peso de la cápsula con la muestra seca. Con estos datos se calcula el contenido de humedad del suelo ($W\%$).

$$W\% = \frac{Peso_{agua}}{Peso_{Sólido}} \times 100$$



Se calcula el peso volumétrico seco (γ_d) con cualquiera de las siguientes fórmulas:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{1 + W} \quad \text{ó} \quad \gamma_d = \frac{\gamma_m}{100 + W\%} 100 \quad \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

DECIMAL

Con esto se obtiene un punto en una gráfica que tendrá como ordenadas peso volumétrico seco (γ_d) y como abscisas contenido de humedad (W%).

Con la misma porción de material de la prueba anterior se disgregan los grumos y se le agrega del 2 % al 3 % del agua con respecto a la masa inicial de la muestra, se mezcla cuidadosamente la porción para homogenizarla y se divide en tres fracciones aproximadamente iguales, en el caso de la prueba estándar y en cinco para la prueba modificada. Se repite el proceso de compactación antes mencionado.

El ensaye terminará cuando el peso del suelo húmedo en las pruebas compactas disminuya en dos ocasiones consecutivas, debiendo tener por lo menos cuatro ensayes y por consecuencia la misma cantidad de puntos en la gráfica, 2 de subida y otros tantos de bajada, para que se defina y tenga suficientes puntos de apoyo la curva de compactación; pero también no deberán realizarse más de 6 ensayes con el mismo suelo, pues este se fatiga y cambia sus características por la aplicación de humedad e impactos.

Se ubican los puntos de la gráfica y se unen, donde se cortan las 2 rectas un poco debajo de dicha unión se traza una curva, la parte superior de ella y hacia el eje de la ordenadas obtendremos el peso volumétrico seco máximo de laboratorio (γ_d Máx. de laboratorio) en el centro de la curva y hacia el eje de las abscisas encontraremos la humedad óptima (W Óptimo) con la que se recomienda compactar este suelo en el campo para que tenga su mejor acomodo.



II.4 Eficiencia del terreno mejorado para la retención de lixiviados.

El estabilizador *Base – Seal* es un Polímero, que endurece o sella caminos de tierra, terraplenes, vertederos de residuos sólidos, bases, sub bases y permite la construcción de caminos secundarios o de penetración. Con este producto las capas de cemento y asfalto duran periodos mucho más largos debido a que proporciona una base más estable e impermeable. Esto representa un promedio de 40% de ahorro, dependiendo de los costos de los materiales y el acarreo de los mismos.

Al tener un suelo mejorado con el estabilizador, obtenemos una mayor resistencia del terreno, lo que garantizará la vida útil del relleno sanitario, así como evitar los posibles asentamientos que se puedan producir del mismo. Lo que nos lleva al aprovechamiento de todos los recursos que se pueden obtener de todo el tonelaje de residuos sólidos almacenada y compactada, como puede ser el aprovechamiento del gas metano, el reciclaje de materiales, y originado de la buena impermeabilidad del terreno se puede obtener el tiempo necesario para el almacenaje y posteriormente tratamiento de los líquidos percolados generados antes de llegar a contaminar los acuíferos. Es importante mencionar que los lixiviados son el resultado de la percolación de líquidos a través de los desechos en proceso de estabilización; es decir, líquidos que brotan a la superficie o se infiltran hacia el terreno donde se encuentra instalado un relleno sanitario o un vertedero de residuos sólidos. Una de sus principales fuentes es el agua de lluvia depositada sobre el área de influencia, o el agua de composición y de la humedad de los desechos que drenan y percolan a través de los intersticios y capas de los residuos sólidos, proporcionando a su paso toda suerte de reacciones y procesos fisicoquímicos y biológicos. El color del lixiviado varía entre 3,000 y 15,000 unidades de color (UC), en tonos que van del café – pardo - grisáceo cuando están frescos, hasta un color negro-viscoso cuando envejecen. Sus olores altamente fétidos y sus características fisicoquímicas, fuertemente variables en cantidad y calidad, hacen que el lixiviado se clasifique como uno de los desechos más contaminantes y que mayor repugnancia genera sobre la comunidad involucrada y el personal técnico que lo debe manipular.

Desde el punto de vista de calidad, los lixiviados presentan altas cargas de DQO y COT; es decir, cantidades considerables de materia orgánica y sustancias inorgánicas que tienen gran variabilidad. Entre dichas sustancias se encuentran metales pesados (con su potencial efecto sobre el ecosistema acuático), alto contenido de sólidos totales y disueltos, presencia de nitrógeno en su forma amoniacal, alta concentración de cloruros, compuestos orgánicos diversos, así como gran variabilidad de pH. Lo anterior depende de la naturaleza de los desechos (pH, edad, temperatura) y de la fase de estabilización en que se encuentre²¹.

Los lixiviados eventualmente pueden ser removidos del relleno sanitario para tratarlos por métodos fisicoquímicos y biológicos y así evitar la contaminación de acuíferos y de las aguas superficiales. Para analizar e interpretar los resultados de eficiencia de cada proceso de tratamiento de lixiviados, se requiere un conocimiento básico de los mecanismos involucrados en la remoción de fracciones de compuestos orgánicos específicos y metales.

Varios investigadores han estudiado el tratamiento de lixiviados de relleno sanitario, obteniendo resultados promisorios mediante diferentes procesos de tratamiento. Estos resultados indican que las eficiencias de remoción de contaminantes obtenidas en un lixiviado dado están influenciadas por la composición química, la cual a su vez está relacionada con las características y grado de estabilización de los residuos sólidos o la edad del relleno sanitario²².

Determinar el tratamiento más adecuado para un lixiviado de relleno sanitario es complicado, ya que se trata de residuos líquidos con alto contenido de sustancias, tanto orgánicas como inorgánicas. Se han realizado vastas investigaciones en busca de tratamientos adecuados para los lixiviados; sin embargo, debido a la heterogeneidad

²¹ Borzacconi *et al.* 1996a, El-Fadel *et al.* 2002

²² Borzacconi *et al.* 1996b, Enzinger *et al.* 1997

en su composición y a la variabilidad de los volúmenes generados, no se pueden extrapolar directamente los resultados obtenidos con tratamientos de un lixiviado a otro. Por lo tanto, cada lixiviado proveniente de un relleno sanitario debe ser evaluado individualmente y sometido a pruebas de tratabilidad para encontrar el sistema de tratamiento adecuado para su manejo.

Conociendo la importancia de los lixiviados tanto en su manejo, control, tratamiento así como la peligrosidad de sus componentes físicos y químicos, podemos decir que en nuestro país es nula la atención que se le da a dichos líquidos, y que en su mayoría llegan a contaminar los acuíferos. Esto es posible debido a que los suelos tienen espacios vacíos interconectados entre sí, a través de los cuales el agua puede fluir desde los puntos de mayor energía hacia los puntos de menor energía; todos los poros del suelo están conectados con sus vecinos. En los suelos gruesos, gravas, arenas e incluso limos es difícil imaginar poros aislados. En las arcillas, formadas como es habitual por partículas aplanadas, podrían existir un pequeño porcentaje de huecos aislados. Las fotografías con microscopio electrónico de arcillas naturales sugieren, sin embargo, que incluso en los suelos de grano más fino todos los huecos están interconectados.

Como los poros de un suelo están aparentemente comunicados entre sí, el agua puede fluir a través de los suelos naturales más compactos. El estudio del flujo de agua a través de un medio poroso es importante en la mecánica de suelos, y por lo tanto en la Ingeniería Ambiental, ya que los daños al medio son irreversibles y nocivos para la salud humana. Es necesario para la estimación de la cantidad de flujo subterráneo bajo varias condiciones hidráulicas, para la investigación de problemas que envuelven la presión del agua bajo una construcción y para realizar el análisis de estabilidad en presas de tierra y estructuras de soporte hechas de tierra que están sujetas a fuerzas debidas al escurrimiento. Para éste estudio se sigue la *ley de Darcy*, la cual propone una simple ecuación para la velocidad de descarga del agua a través de los suelos saturados. Se debe tener muy en cuenta que la ecuación de Darcy sólo es aplicable en suelos más finos que las arenas gruesas. Además, que el flujo de entre dos puntos cualesquiera dependen sólo de la diferencia de carga total. De la mecánica de fluidos sabemos que, de acuerdo a la ecuación de Bernoulli, la altura total en un punto de análisis de agua en movimiento puede determinarse como la suma de la presión, la velocidad y la elevación.

El ciclo hidrológico, es el proceso que resulta en la circulación del agua por toda la tierra. Este proceso empieza cuando el agua se evapora de la superficie del océano y asciende a la atmósfera. Las corrientes de aire que se mueven constantemente en la atmósfera de la Tierra llevan hacia los continentes el aire húmedo. Cuando el aire se enfría, el vapor se condensa y forma gotitas de agua. Por lo general se ven en forma de nubes. Con frecuencia las gotitas se juntan y forman gotas de lluvia. Si la atmósfera está lo suficientemente fría, en vez de gotas de lluvia se forman copos de nieve. Al caer al suelo, el agua se junta en riachuelos o se infiltra en el suelo y empieza su viaje de regreso al mar. La figura 11 muestra el proceso de manera simplificada.

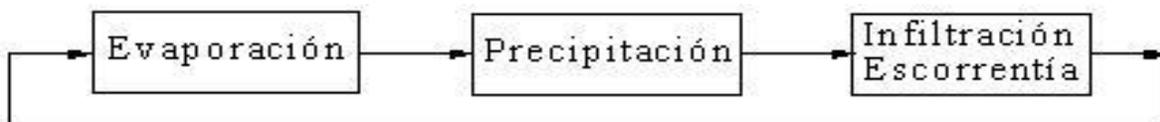


Figura 11. Esquema simplificado del ciclo hidrológico.

Este comportamiento dinámico del estado físico del agua, tiene un elemento motriz. La fuente de la energía necesaria para el movimiento del agua proviene del calor del sol y la gravedad.

Estas fuentes de energía actúan en diferentes procesos que forman parte del ciclo del agua, éstos son:



Evaporación.- Gracias a la acción del sol buena parte del agua que está en la superficie terrestre se evapora por la radiación calórica del suelo o por la transpiración de las plantas, convirtiéndose en vapor de agua. Éste vapor llega a la atmósfera y es transportado por los vientos, donde luego se condensa formando así nubes.

Precipitación.- Cuando el agua contenida en las nubes cae de la atmosférica y se deposita en la superficie terrestre, se dice que hay precipitación. Ésta ocurre en forma líquida (lluvia y rocío) o sólida (granizo, nieve y escarcha).

Infiltración.- Una parte del agua que ha precipitado, por gravedad ingresa al interior del suelo muchas veces a grandes profundidades, a lo que se llama infiltración.

Escorrentía.- El agua que no se infiltra en el suelo, corre por encima de la superficie terrestre a las partes más bajas y llega a formar parte de los ríos, lagos, ciénagas y finalmente llega al mar.

La clave fundamental para evitar que un acuífero sea contaminado es sin duda el buen manejo y tratamiento que se le den a todos los contaminantes que llegan a él, pero una propiedad del suelo que puede resultar de mucha ayuda es la impermeabilidad que pueda llegar a tener, ya que da el tiempo necesario para poder recolectar todo el líquido que sea generado antes de llegar a los mantos acuíferos. A continuación se menciona en qué consiste la permeabilidad de un suelo:

La permeabilidad es una propiedad hidráulica de los suelos, donde el suelo permite hasta cierto grado particular, un movimiento de agua perceptible a través del mismo en estado saturado. La permeabilidad intrínseca se mide en unidades de área, se considera a los suelos compuestos de grava y arena como de alta permeabilidad, mientras a los suelos arcillosos como muy poco permeables.²³

Los suelos están formados por partículas minerales con agua o gas entre sus espacios vacíos. Los espacios vacíos están interconectados entre sí de diversas maneras, por lo tanto el agua puede pasar a través de éstas en descenso de las zonas de alta presión a las de baja presión. El nivel de agua descenderá hasta detenerse, esto es cuando se encuentre un equilibrio entre la presión atmosférica y la presión de poros del suelo. Este nivel de agua, recibe el nombre de superficie freática o nivel freático de agua.

Los continuos espacios vacíos en un suelo, pueden comportarse en conjunto como tubos capilares con secciones transversales diferentes. Estos se comunican entre sí en toda dirección, constituyendo un enrejado de vacíos. Si este enrejado es invadido desde abajo por agua (nivel freático), ésta ascenderá gradualmente.

La figura 12, muestra que hasta una altura h_{cc} por encima del nivel freático, el suelo se encuentra completamente saturado. A una altura comprendida entre h_{cc} y h_c , se encuentra parcialmente saturado de agua.

²³ Crespo Villalaz, 1999.

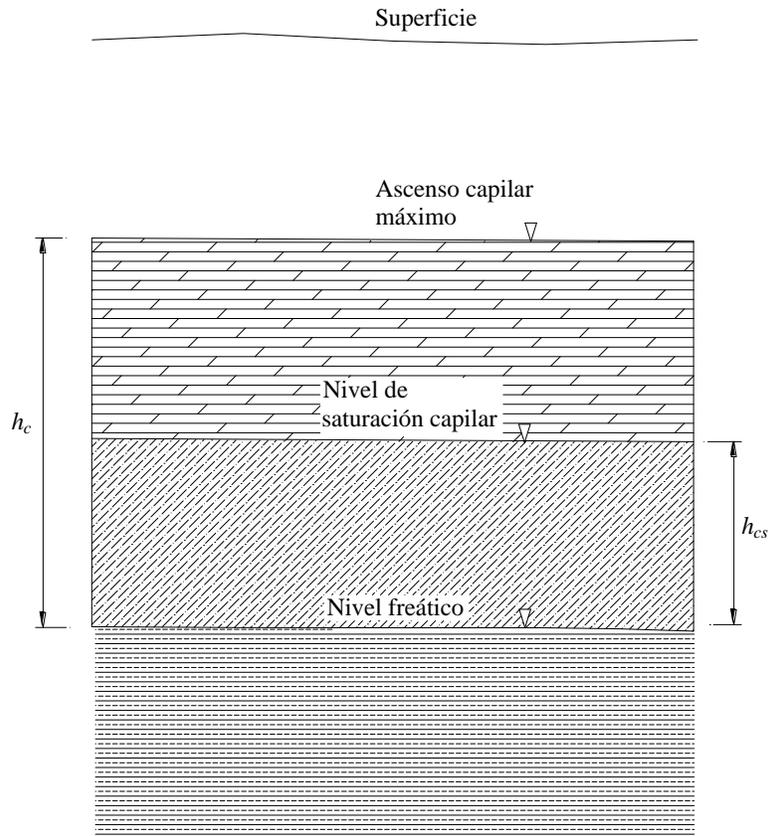


Figura 12. Ascensión capilar de agua en el suelo.

La conductividad hidráulica (k), es una constante que da una idea de la resistencia que ofrece el suelo al flujo de agua.

Esta constante es medida en términos de velocidad y depende en gran manera de la estructura del suelo y depende de algunos factores tanto del suelo como del agua que circula en éste, como puede ser:

- La estructura del suelo.
- El índice de vacíos.
- La textura de las partículas, además de su rugosidad.
- Densidad.
- Viscosidad.

El intervalo de valores para la conductividad hidráulica es muy amplio. En el cuadro número 9 se muestran algunos valores de la conductividad hidráulica para diferentes tipos de suelos.



Cuadro No. 9. Conductividad hidráulica para diversos suelos.²⁴

Tipo de suelo	Conductividad hidráulica cm/seg
Grava limpia	1 a 100
Arena y grava mezclada	10^{-2} a 10
Arena gruesa limpia	10^{-2} a 1
Arena fina	10^{-2} a 10^{-1}
Arena limosa	10^{-3} a 10^{-2}
Arena arcillosa	10^{-4} a 10^{-2}
Limo	10^{-8} a 10^{-2}
Arcilla	10^{-10} a 10^{-6}

En el cuadro No. 10, se da una orientación de que tan permeables son los suelos según su coeficiente de permeabilidad.

Cuadro No. 10. Clasificación del grado de permeabilidad del suelo. (Crespo Villalaz, 1999)

Grado de permeabilidad	Valor de k en [cm/seg]
Elevada	Superior a 10^{-1}
Media	10^{-1} a 10^{-3}
Baja	10^{-3} a 10^{-5}
Muy baja	10^{-5} a 10^{-7}
Practicamente impermeable	menor de 10^{-7}

Existen tres maneras comunes para conocer la conductividad hidráulica de un suelo mediante: ensayos hechos en laboratorio, relaciones y métodos empíricos y ensayos hechos en campo.

Existe un procedimiento sencillo para determinar la conductividad hidráulica de un suelo, y se pueden emplear los siguientes permeámetros:

- a) *Permeámetro de carga constante*
- b) *Permeámetro de carga variable*

Permeámetro de carga constante.- Es utilizado para suelos de grano grueso, compuestos de: arena y grava. Este permeámetro puede medir conductividades hidráulicas de: $k > 10^{-4}$ cm/s. La figura 13 muestra el permeámetro de carga constante. Para determinar la conductividad hidráulica deben seguirse los siguientes pasos:

Paso 1. La muestra de suelo se introduce en un cilindro de plástico transparente, donde se instalan filtros de piedra porosa por encima y por debajo de ésta.

Paso 2. Se debe saturar completamente la muestra de agua, para lo cual se suministrará agua que sea desairada al reservorio superior. Luego se abren las válvulas y se deja circular agua controlando la velocidad del flujo con las

²⁴ Crespo Villalaz, 1999.

válvulas, hasta que los niveles de agua de los piezómetros se mantengan constantes. Lo que significa que la muestra estará completamente saturada de agua.

Paso 3. Inicialmente se deja correr un flujo de agua, controlado por las válvulas por un tiempo t . luego, se registran las alturas piezométricas y el volumen de agua recolectada por el recipiente graduado.

Después se modifica el caudal (q) y se repite el mismo procedimiento, se deben efectuar varios ensayos con diferentes caudales. La conductividad hidráulica será:

$$k = \frac{Q \cdot L}{\Delta h \cdot A \cdot t}$$

Donde:

- k = Conductividad hidráulica.
- L = Longitud de la muestra. (Véase a figura 14)
- h = Pérdida de carga. (Véase a figura 14)
- Q = Volumen de agua recolectada por el cilindro graduado.
- A = Área transversal interna del cilindro. (Sección transversal)
- t = Tiempo de duración el ensayo.

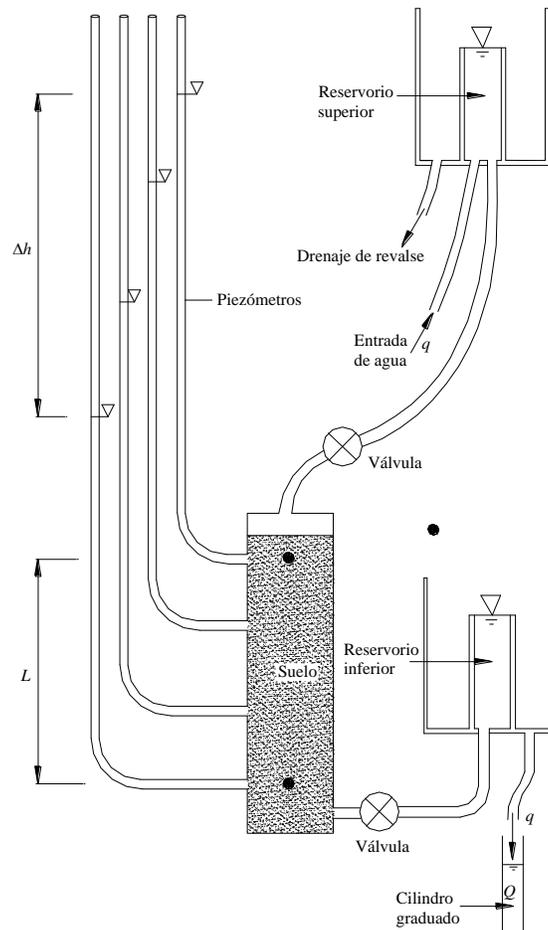


Figura 13. Permeámetro de carga constante.

Paso 4. Luego de determinar diferentes conductividades hidráulicas (k), para cada variación del caudal (q), la media aritmética de todas las conductividades hidráulicas obtenidas será la conductividad hidráulica.

Paso 5. Finalmente debe realizarse, una corrección de la conductividad hidráulica por efecto de la temperatura, los resultados deben ser expresados para una temperatura de 20° C.

Permeámetro de carga variable.- El permeámetro que se muestra en la figura 14, generalmente es usado para suelos de grano fino como pueden ser: arenas finas, limos y arcillas; y se pueden medir conductividades comprendidas entre: $10^{-4} < k < 10^{-7}$ cm/s.

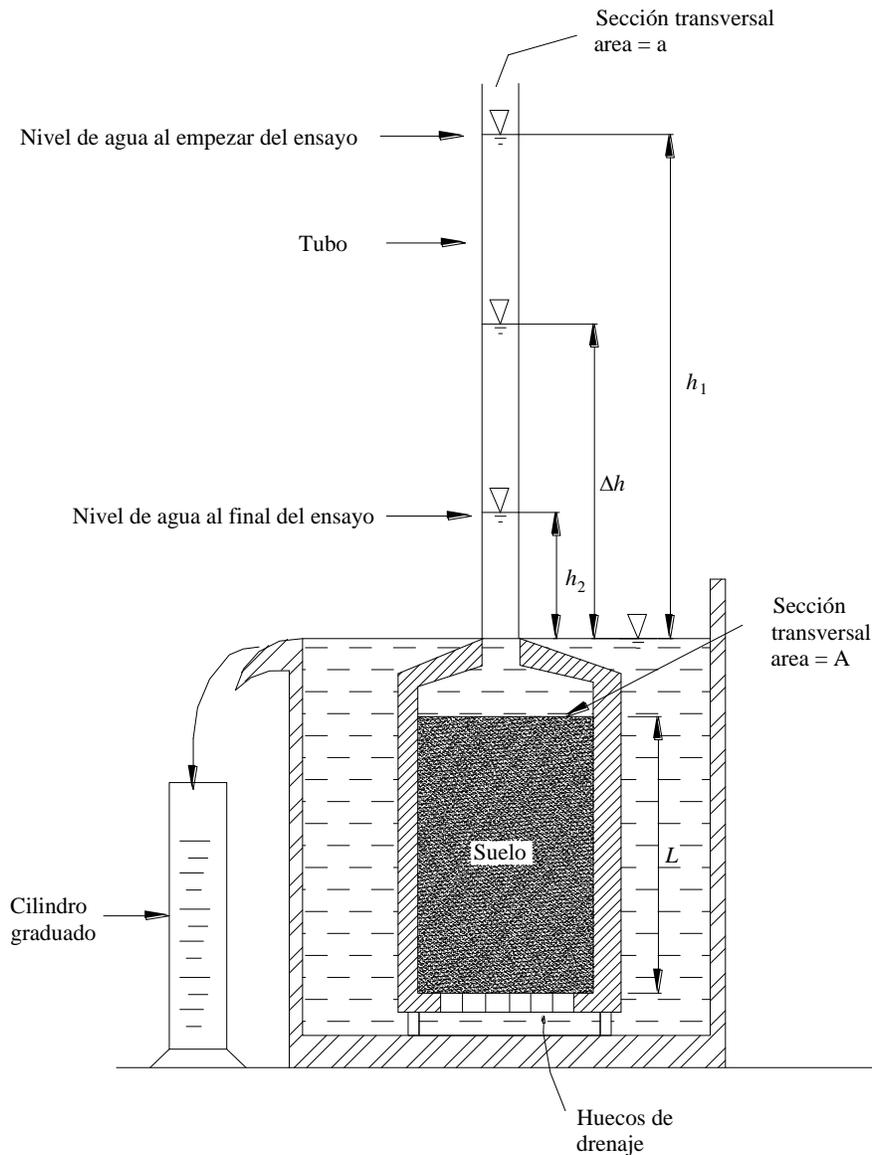


Figura 14. Permeámetro de carga variable.



Aunque el ensayo de carga variable es principalmente aplicado a suelos finos, también puede proporcionar resultados aceptables en cualquier tipo de suelo, para lo cual deben seguirse los siguientes pasos:

Paso 1. En un cilindro de 100 mm. de diámetro, se introduce una muestra inalterada de suelo, donde los extremos superior e inferior están protegidos por una piedra porosa.

Paso 2. La muestra debe estar completamente saturada de agua, para ello se sigue el mismo procedimiento que para el permeámetro de carga constante.

Paso 3. Después de que la muestra ha sido saturada, se introduce en un reservorio anegado de agua que cuenta con un vertedor que mantiene un nivel constante. El ensayo empieza cuando se llena de agua el tubo que está conectado al extremo superior del cilindro con la muestra de suelo, entonces permite que el agua desairada pase a través de la muestra de suelo. Se registra el nivel inicial de la columna de agua en el tubo al empezar el ensayo y también a diferentes tiempos durante el ensayo.

La conductividad hidráulica (k), es obtenida de la siguiente expresión:

$$k = \frac{a \cdot L \cdot \ln(h_1/h_2)}{A \cdot (t_2 - t_1)}$$

Donde:

k = Conductividad hidráulica.

L = Longitud de la muestra.

a = Área de la sección transversal del tubo.

h_1 = Nivel inicial del agua en el tubo al empezar el ensayo.

h_2 = Nivel final del agua en el tubo al finalizar el ensayo.

A = Área transversal interna del cilindro. (Sección transversal)

t_1 = Tiempo al iniciar el ensayo, cuando el nivel de agua en el tubo está en h_1 .

t_2 = Tiempo al finalizar el ensayo, cuando el nivel de agua está en h_2 .

Paso 4. Se repite el ensayo con diferentes diámetros del tubo, calculando diferentes conductividades hidráulicas (k), donde se tendrá una variación del caudal (q).

La media aritmética de todas éstas obtenidas será la conductividad hidráulica.

Paso 5. Finalmente, se debe realizar una corrección de la conductividad hidráulica por efecto de la temperatura, los resultados deben ser expresados para una temperatura de 20° C.



CAPÍTULO III. RESULTADOS.



III.1 Características de resistencia y permeabilidad del suelo mejorado con un estabilizador.

Se realizaron en laboratorio algunas pruebas como lo establece la norma NOM-083-SEMARNAT-2003, para establecer el tipo de suelo que se está ensayando, así como el comportamiento que sufrirán las muestras al ser ensayadas con el estabilizador de suelos *Base – Seal*. Los resultados se describen a continuación:

GRANULOMETRÍA

Se extrae material seco de los contenedores para ensayo en el laboratorio de pavimentos de la ESIA UZ.

Material seco en estado natural = 699.4 gr

No. Malla	Material retenido en gr.	Porcentaje retenido %	Porcentaje que pasa %
4	30.025	4.29	95.71
10	33.9	4.85	90.86
20	75.65	10.82	80.04
40	91.15	13.03	67.01
60	104.50	14.94	52.07
100	165.30	23.63	28.44
200	128.50	18.37	10.07
Charola de fondo.	67.0	10.07	0.00

Con los datos obtenidos y empleando la gráfica de composición granulométrica del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS, ver en anexos), obtenemos los siguientes resultados:

$D_{10} = 0.074 \text{ mm.}; D_{30} = 0.162 \text{ mm.}; D_{60} = 0.340 \text{ mm.}$

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 4.60 \qquad Cc = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10})(D_{60})} = 1.03$$

Considerar que será:

Grava bien graduada **GW** Cuando $Cu > 4$ y Cc entre 1 y 3

Grava mal graduada **GP**: Cuando no satisface todos los requisitos de **GW**

Arena bien graduada **SW** Cuando $Cu > 6$ y Cc entre 1 y 3

Arena mal graduada **SP**: Cuando no satisface todos los requisitos de **SW**

Por lo tanto, tenemos una arena *mal graduada*.

Esta prueba de granulometría se realizó para conocer el tipo de suelo que se va a ensayar en las siguientes pruebas.



EQUIVALENTE DE ARENAS

Se agregan 100 gr. de material en estado natural en cada una de las probetas, y las lecturas fueron las siguientes:

Lectura en la probeta 1 = lectura de arcilla = 5.6”
= lectura de arena = 2.4”

$$EA = \frac{Lectura_{arena}}{Lectura_{arcilla}} \times 100 = 42.86 \%$$

Lectura en la probeta 2 = lectura de arcilla = 5.8”
= lectura de arena = 2.6”

$$EA = \frac{Lectura_{arena}}{Lectura_{arcilla}} \times 100 = 44.83 \%$$

Lectura en la probeta 3 = lectura de arcilla = 5.5”
= lectura de arena = 2.65”

$$EA = \frac{Lectura_{arena}}{Lectura_{arcilla}} \times 100 = 48.18\%$$

Equivalente de arenas estado natural promedio = 43.85 %

Ahora se agregan 100 gr. de material mezclado con estabilizador en cada una de las probetas, y las lecturas fueron las siguientes:

Lectura en la probeta 1 = lectura de arcilla = 5.2”
= lectura de arena = 2.5”

$$EA = \frac{Lectura_{arena}}{Lectura_{arcilla}} \times 100 = 48.08 \%$$

Lectura en la probeta 2 = lectura de arcilla = 4.75”
= lectura de arena = 2.5”

$$EA = \frac{Lectura_{arena}}{Lectura_{arcilla}} \times 100 = 52.63 \%$$

Lectura en la probeta 3 = lectura de arcilla = 4.75”
= lectura de arena = 2.3”

$$EA = \frac{Lectura_{arena}}{Lectura_{arcilla}} \times 100 = 48.42\%$$

Equivalente de arenas con estabilizador promedio = 49.71 %

El equivalente de arenas promedio con suelo estabilizado fue mayor al suelo natural, por lo que podemos concluir que el suelo al ser estabilizado eliminó y expulsó mayor cantidad de materia orgánica y mejoró el porcentaje de arena limpia en el suelo.



COMPACTACIÓN PORTER EN ESTADO NATURAL.

Se colocan 4000 gr. de material en estado natural en el cilindro con extensión y se toma un testigo en la cápsula de aluminio para posteriormente obtener su peso que fue de 130.45 gr.

Peso de cápsula = 26.3 gr.; peso del molde = 6.932 Kg.; peso del molde con material = 10.935 Kg.; peso de la muestra = 4.003 Kg.

Altura del especimen = 9.90 cm.

Área del cilindro = 192.36 cm²; Volumen de la muestra = 1904.36 cm³

Se calcula su peso volumétrico húmedo:

$$\& m = \frac{(Wm)(Kg)}{(Vc)m^3} = 2102.02 \text{ Kg. / m}^3$$

Ahora se calcula el contenido de humedad.

Peso de la capsula con material seco = 123.5 gr.

Peso del agua Ww = 130.45gr. – 123.5 gr. = 6.95 gr.

Peso del material seco = 123.5 gr. – 26.3 gr. = 97.2 gr.

$$W = \frac{Ww}{Ws} \times 100 = 7.15 \%$$

Calcular el peso volumétrico seco máximo de laboratorio.

$$\&_{Max} = \frac{\&_m}{100 + w} \times 100 \therefore \frac{Kg}{m^3} = 1961.75 \text{ Kg. / m}^3$$

Después de realizar en el ensayo en la máquina para aplicar presión con capacidad de 30 toneladas y posteriormente saturar de agua el espécimen se toma la lectura con el micrómetro, transcurriendo 24 horas se toma la lectura final.

La expansión se obtiene con la siguiente expresión:

Lectura inicial = 1.28 mm; lectura final = 1.97 mm; altura del especimen compacto= 99 mm

$$Expansión = \frac{lectura_{final} - lectura_{inicial}}{Altura_{especimen_{compacto}}} \times 100 = 0.70\%$$



VALOR RELATIVO DE SOPORTE (V.R.S.)

Teniendo el espécimen en estado natural después de haberlo saturado 24 horas, se lleva a la máquina para aplicar presión y se obtienen los siguientes datos:

Penetraciones en mm	Cargas en KN	Conversión a Kg.
1.27	2.488	243.82
2.54	6.788	665.22
3.81	10.101	989.90
5.08	11.93	1169.14
7.62	12.40	1215.20
10.16	13.30	1303.40
12.7	14.32	1403.36

Graficando en la prueba de Valor Relativo de Soporte (ver gráfica en anexos), se obtienen los siguientes datos:

Realizando la corrección en la grafica, obtenemos: Carga en Kilogramos = 800 Kg.

$$V.R.S := \frac{Carg\ a_{corregida}^{a254(mm.)}}{1360} \times 100 = 58.82 \%$$



COMPACTACIÓN PORTER CON ESTABILIZADOR

Se realiza el mismo procedimiento de las pruebas anteriores. Se colocan 4000 gr. de material con estabilizador en el cilindro con extensión y se toma un testigo en una capsula de aluminio y su peso fue de 97.2 gr.

Peso de cápsula = 16.15 gr.; peso del molde = 6.932 Kg.; peso del molde con material = 10.673 Kg.; peso de la muestra = 3.741 Kg.

Altura del especimen = 9.20 cm

Área del cilindro = 193.59 cm²; Vol. de la muestra = 1781.03 cm³

Se calcula su peso volumétrico húmedo:

$$\& m = \frac{(Wm)(Kg)}{(Vc)m^3} = 2100.47 \text{ Kg. / m}^3$$

Se calcula el contenido de humedad.

Peso de la capsula con material seco = 89.6 gr.

Peso del agua $W_w = 97.2 \text{ gr.} - 89.6 \text{ gr.} = 7.60 \text{ gr.}$

Peso del material seco = 89.6 gr. – 16.15 gr. = 73.45 gr.

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100 = 10.35 \%$$

Calcular el peso volumétrico seco máximo de laboratorio.

$$\&_{Max} = \frac{\&_m}{100 + w} \times 100 \therefore \frac{Kg}{m^3} = 1903.44 \text{ Kg. / m}^3$$

Después de realizar el ensayo en la máquina para aplicar presión con capacidad de 30 toneladas y posteriormente saturar de agua el especimen se toma la lectura con el micrómetro, transcurriendo 24 horas se toma la lectura final.

La expansión se obtiene con la siguiente expresión:

Lectura inicial = 0.46 mm; lectura final = 0.71 mm; altura del espécimen compacto= 92 mm

$$Expansión = \frac{lectura_{final} - lectura_{inicial}}{Altura_{especimen_{compacto}}} \times 100 = 0.27\%$$



Teniendo el mismo espécimen con estabilizador después de haberlo saturado 24 horas, se lleva a la máquina para aplicar presión y se obtienen los siguientes datos:

Penetraciones en mm	Cargas en KN	Conversión a Kg.
1.27	1.45	142.10
2.54	4.28	419.44
3.81	9.40	921.20
5.08	13.30	1303.40
7.62	17.56	1720.88
10.16	19.00	1862.00
12.7	19.49	1910.02

Graficando en la prueba de Valor Relativo de Soporte (ver gráfica en anexos), se obtienen los siguientes datos:

Realizando la corrección en la gráfica, obtenemos: Carga en Kilogramos = 1150 Kg.

$$V.R.S := \frac{Carga_{corregida} a_{254}(mm.)}{1360} \times 100 = 84.56 \%$$



Posteriormente, en una segunda etapa se realizaron pruebas con otro tipo de suelo mejorado ahora con cal y estabilizador. Los resultados fueron los siguientes:

Después de haber realizado la granulometría y de acuerdo a los datos obtenidos de la curva de composición granulométrica (ver en anexos), no fue posible determinar el diámetro número 10, por lo que nos apoyamos en las pruebas de límites de consistencia para determinar el tipo de suelo ensayado y los resultados fueron los siguientes:

Peso de la cápsula = 16.9; material húmedo = 25.5 gr.; material seco = 23.11 gr.; $W = 25.5 - 23.11 = 2.39$ gr.; número de golpes $n = 24$

$$\%W = W_w / W_s \times 100 = \mathbf{38.49\%}$$

$$\text{Límite líquido} = \%W (n / 25)^{0.12} = \mathbf{38.30}$$

$$\text{Índice plástico} = 0.73 (LI - 20) = \mathbf{13.36}$$

De acuerdo a los resultados de los límites de Atterberg y empleando la carta de plasticidad del SUCS (ver carta en anexos) obtenemos: una **arena limosa de baja plasticidad**.

GRANULOMETRIA.

Material seco = 700 gr

No. Malla	Material retenido en gr.	Porcentaje retenido %	Porcentaje que pasa %
4	22.5	3.21	96.79
10	45.8	6.54	90.25
20	65.8	9.40	80.85
40	66.0	9.43	71.42
60	62.5	8.93	62.49
100	77.8	11.11	51.38
200	193.8	27.69	23.69
Charola de fondo.	165.8	23.69	0

ARENA LIMOSA DE BAJA PLASTICIDAD



COMPACTACION PROCTOR ESTANDAR (TERRENO NATURAL)

ESPECIMEN NUMERO	1	2	3	4	5	6
CAPSULA NUMERO	93	10	8	55	89	16
MASA DE CAPSULA + SUELO HUMEDO (gr.)	46.67	43.95	74.80	50.24	52.01	41.58
MASA DE CAPSULA + SUELO SECO (gr.)	42.23	39.65	64.43	45.08	44.23	35.34
MASA DEL AGUA (gr.)	4.44	4.30	10.37	5.16	7.78	6.24
MASA DE CAPSULA (gr.)	14.81	17.00	16.74	24.94	17.03	16.78
MASA SUELO SECO Ws (gr.)	27.42	22.65	47.69	20.14	27.20	18.56
CONTENIDO DE AGUA w (%)	16.19	18.98	21.74	25.62	28.60	33.62
MASA DE MOLDE + SUELO HUMEDO (gr.)	3339.72	3409.80	3491.03	3559.62	3652.50	3627.46
MASA DE MOLDE (gr.)	1946.72	1946.72	1946.72	1946.72	1946.72	1946.72
MASA DE SUELO HUMEDO Wm (gr.)	1393	1463.08	1544.31	1612.90	1705.78	1680.74
VOLUMEN DEL MOLDE V (m3)	929.37	929.37	929.37	929.37	929.37	929.37
MASA VOLUMETRICA HUMEDA (Kg/m3)	1499	1574	1662	1736	1835	1809
MASA VOLUMETRICA SECA (Kg/m3)	1290	1323	1365	1382	1427	1354

PESO VOLUMETRICO SECO MAXIMO = 1427 Kg/m³
 HUMEDAD OPTIMA = 28.60 %

COMPACTACION PROCTOR ESTANDAR (CON ESTABILIZADOR)

ESPECIMEN NUMERO	1	2	3	4	5	6
CAPSULA NUMERO	93	10	8	55	89	16
MASA DE CAPSULA + SUELO HUMEDO (gr.)	45.62	59.54	64.13	71.94	69.94	47.76
MASA DE CAPSULA + SUELO SECO (gr.)	42.55	54.18	56.95	63.69	59.41	40.70
MASA DEL AGUA (gr.)	3.07	5.36	7.18	8.25	10.53	7.06
MASA DE CAPSULA (gr.)	14.81	17.00	16.74	24.94	17.03	16.78
MASA SUELO SECO Ws (gr.)	27.74	37.18	40.21	38.75	42.38	23.92
CONTENIDO DE AGUA w (%)	11.07	14.42	17.86	21.29	24.85	29.52
MASA DE MOLDE + SUELO HUMEDO (gr.)	3295.23	3409.14	3490.86	3604.63	3712.22	3718.64
MASA DE MOLDE (gr.)	1946.72	1946.72	1946.72	1946.72	1946.72	1946.72
MASA DE SUELO HUMEDO Wm (gr.)	1348.51	1462.42	1544.14	1657.91	1765.50	1771.92
VOLUMEN DEL MOLDE V (m3)	929.37	929.37	929.37	929.37	929.37	929.37
MASA VOLUMETRICA HUMEDA (Kg/m3)	1451	1574	1662	1784	1900	1907
MASA VOLUMETRICA SECA (Kg/m3)	1306	1376	1410	1471	1522	1472

PESO VOLUMETRICO SECO MAXIMO = 1515 Kg/m³
 HUMEDAD OPTIMA = 24.85 %



COMPACTACION PROCTOR ESTANDAR (CON ESTABILIZADOR Y CAL)

ESPECIMEN NUMERO	1	2	3	4	5	6
CAPSULA NUMERO	70	23	19	16	29	
MASA DE CAPSULA + SUELO HUMEDO (gr.)	58.57	50.94	80.22	74.63	92.84	
MASA DE CAPSULA + SUELO SECO (gr.)	54.04	45.35	74.06	62.64	80.37	
MASA DEL AGUA (gr.)	4.53	5.59	6.16	11.99	12.47	
MASA DE CAPSULA (gr.)	25.24	16.76	25.16	16.78	25.31	
MASA SUELO SECO W _s (gr.)	28.80	28.59	48.90	45.86	55.06	
CONTENIDO DE AGUA w (%)	15.73	19.55	12.60	26.14	22.65	
MASA DE MOLDE + SUELO HUMEDO (gr.)	3401.43	3457.87	3561.68	3645.59	3705.32	
MASA DE MOLDE (gr.)	1946.72	1946.72	1946.72	1946.72	1946.72	
MASA DE SUELO HUMEDO W _m (gr.)	1454.71	1511.15	1614.96	1698.87	1758.60	
VOLUMEN DEL MOLDE V (m ³)	929.37	929.37	929.37	929.37	929.37	
MASA VOLUMETRICA HUMEDA (Kg/m ³)	1565.26	1626	1738	1828	1892	
MASA VOLUMETRICA SECA (Kg/m ³)	1353	1360	1544	1449	1543	

PESO VOLUMETRICO SECO MAXIMO = 1544 Kg/m³
 HUMEDAD OPTIMA = 22.5 %

De los especímenes ensayados anteriormente, se llevan a la máquina de compresión simple y obtenemos los siguientes valores:

✚ Suelo en estado natural: Carga en KN = 5.40; deformación en mm. = 3.89; área del especimen = 78.54 cm²

Convirtiendo a Kg. se tienen 550.65 Kg. Por lo tanto, el suelo tiene una resistencia de = **7.01 Kg. / cm²**

✚ Suelo con estabilizador: Carga en KN = 13.598; deformación en mm. = 5.60; área del especimen = 78.54 cm²

Convirtiendo a Kg. se tienen 1386.61 Kg. Por lo tanto, el suelo tiene una resistencia de = **17.65 Kg. / cm²**

✚ Suelo con estabilizador + cal: Carga en KN = 12.536; deformación en mm. = 6.243;
 Área del especimen = 78.54 cm²

Convirtiendo a Kg. se tienen 1278.32 Kg. Por lo tanto, el suelo tiene una resistencia de = **16.28 Kg. / cm²**



III.2 Reacciones del estabilizador con los componentes químicos de los lixiviados.

Es importante conocer las posibles reacciones que pueda llegar a tener el estabilizador de suelo *Base – Seal* al entrar en contacto con los lixiviados. Por lo que se realizaron experimentos en la Planta de tratamiento de lixiviados ubicada en bordo poniente.

Se analizó medio litro de lixiviado maduro con las siguientes características:

En el cuadro número 11 se muestran las características fisicoquímicas generales de los lixiviados utilizados en el estudio. Los datos corresponden a los valores máximos y mínimos obtenidos en las fechas de muestreo.

Cuadro No. 11. Características fisicoquímicas del lixiviado ensayado.

Parámetro	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
	Intervalo				
pH	7.93 – 8.26	7.94 – 8.21	7.99 – 8.29	7.91 – 9.09	8.07 – 8.66
Conductividad (µm/cm)	33516 - 37053	36520 - 44732	36159 - 44028	36947 – 67438	32468 – 58154
SDT (mg/l)	16758 - 18526	18260 - 22366	18079 - 22014	18473 - 33719	16,234 - 29077
*DQO (mg/l)	3440	3606	3480	3720	NR
*Cloruros (mg/l)	4560	5536	4989	4620	NR
*STT (mg/l)	16808	24110	19047	18063	NR

*Los análisis se realizaron sólo una vez por mes.

El pH es alcalino, esto indica que los lixiviados se encuentran en la última etapa de estabilización. También presenta una coloración oscura intensa, típica de lixiviados estabilizados y que de acuerdo a Artiola - Fortuny y Fuller (1982) es atribuida a la presencia de sustancias húmicas.

Los altos niveles de conductividad y de los Sólidos Disueltos Totales (SDT) son una medida indirecta de las elevadas concentraciones que se tiene de iones disueltos como calcio, sodio, magnesio, etc.

Los SDT llegan a representar concentraciones mucho más elevadas que las que se reportan en lixiviados estabilizados (1200 mg SDT/l) según reporta Qasim y Chian (1994).

Los valores de conductividad que van de los 33 a 67 µm/cm son mayores que los reportados para agua de mar (35 – 40 g/l), lo cual se cree que hay mezcla entre los lixiviados y el agua freática de la zona.

Las concentraciones de iones cloruro que se han cuantificado en estos lixiviados alcanzan los 6000 mg/l.

La concentración de materia orgánica expresada como DQO, corrobora el grado de estabilización de los lixiviados en estudio, clasificándolos como estabilizados o viejos de acuerdo a la clasificación Amokrane et al (1977).

La mayoría de los parámetros fisicoquímicos reportan valores que se encuentran en el orden de magnitud característicos de lixiviados estabilizados.

A continuación se muestra y describe el procedimiento del experimento:



Se colocó en un vaso de precipitados 500 ml. de lixiviado. El pH inicial fue de **8.44** y se fueron agregando 10 ml. de estabilizador de suelo *Base Seal* cada 5 minutos hasta alcanzar la cantidad de 25 ml. de estabilizador. Después de 20 minutos el líquido percolado cambió su composición física, pasando de estado líquido a gel, con un pH último de 9.62



El primer resultado preliminar del ensayo fue el siguiente: el lixiviado en estudio cambió su propiedad de estado físico a sólido (gel) y su color cambio de negro a café oscuro.



Posteriormente, se ensayó una segunda muestra con 500 ml. de lixiviado de las mismas características antes mencionadas. Ahora se agregaron 50 ml. de estabilizador en un lapso de media hora. Trascurrido ese tiempo, los resultados fueron los siguientes:

Cambio de color en el líquido, de negro a café obteniendo un pH último de 10.04; el lixiviado cambió completamente su estado líquido a sólido (gel).



Después de 20 días de reposo de estas 2 muestras, se obtuvieron los siguientes resultados finales:

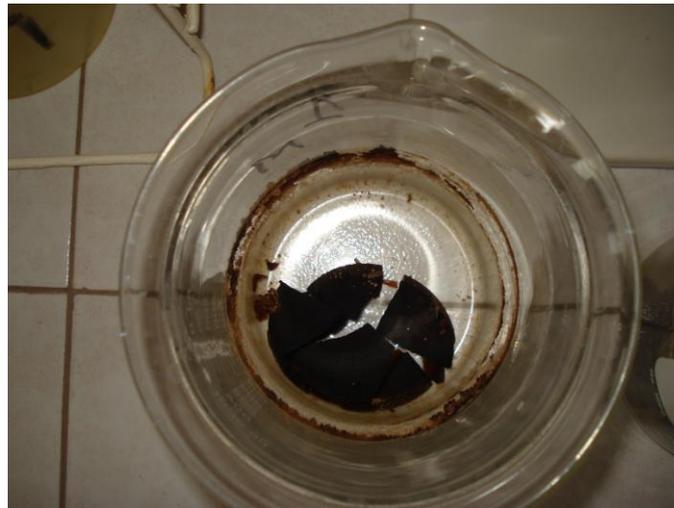


Las muestras ensayadas después de 20 días de reposo perdieron todo el contenido de agua y quedaron solamente residuos de gel como se muestran en las fotografías.

De 500 ml. de lixiviado combinado con 25 ml. de estabilizador, después de 20 días de reposo quedaron únicamente 23.65 gr. de residuos de gel de lixiviado.

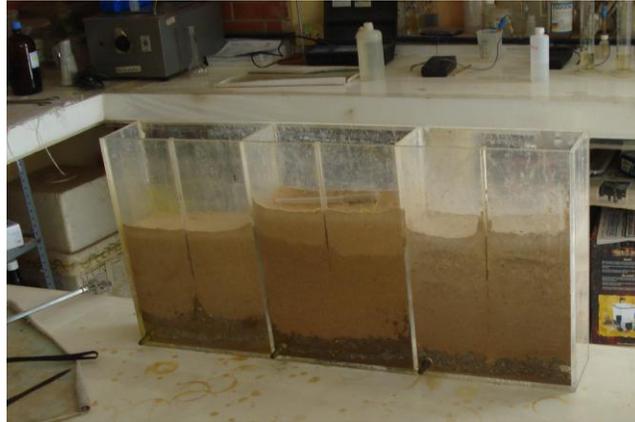
De 500 ml. de lixiviado combinado con 50 ml. de estabilizador, después de 20 días de reposo quedaron solamente 43.36 gr. de residuos de gel de lixiviado.

En las siguientes fotografías se muestran los residuos:



III.3 Eficiencia del suelo mejorado en la retención de los lixiviados.

Se realizaron experimentos en un acrílico con 3 separaciones. En cada separación se colocó una arena fina bien graduada (realizando prueba granulométrica en laboratorio). Se conformaron varias capas para ir compactando la arena hasta obtener un espécimen de aproximadamente 15 cm. en la parte inferior del acrílico se colocó una capa de 2 cm. de gravilla como se muestra en la siguiente fotografía:



La primera capa de izquierda a derecha se conformó de arena fina en su estado natural. La segunda capa se conformó con arena fina mezclada con estabilizador *Base – Seal* y la tercera se conformó con arena fina mezclada con estabilizador y se le agregó 2% de cal.

Posteriormente se le agregó lixiviado a las 3 muestras, siguiendo el procedimiento de la literatura consultada. El ensayo concluyó después de haber salido por las válvulas de la parte inferior del acrílico la primer gota de lixiviado.

Existe un procedimiento sencillo para determinar la conductividad hidráulica de un suelo, y se pueden emplear los siguientes permeámetros:

- a) *Permeámetro de carga constante*
- b) *Permeámetro de carga variable*

Se realizó el ensayo de acuerdo al procedimiento del permeámetro de carga variable por lo siguiente: el permeámetro de carga variable generalmente es usado para suelos de grano fino como pueden ser: arenas finas, limos y arcillas, y se pueden medir conductividades comprendidas entre: $10^{-4} < k < 10^{-7}$ cm/s.

De acuerdo al procedimiento antes mencionado, se obtuvieron los siguientes datos para su cálculo:

Muestra 1. Arena fina bien graduada compactada en estado natural.



Longitud de la muestra. $L = 12.5$ cm.

Área de la sección transversal del tubo. $a = 12 \times 20$ cm. = 240 cm²

Nivel inicial del agua en el tubo al empezar el ensayo. $h_1 = 12$ cm.

Nivel final del agua en el tubo al finalizar el ensayo. $h_2 = 11$ cm.

Área transversal interna del cilindro. $A = 12.5 \times 20$ cm = 250 cm²

Tiempo al iniciar el ensayo cuando el nivel de agua en el tubo está en h_1 . $t_1 = 0$ segundos.

Tiempo al finalizar el ensayo cuando el nivel de agua está en h_2 . $t_2 = 2$ horas, 36 minutos, 50 segundos.

La conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad (k), es obtenida de la siguiente expresión:

$$k = \frac{a \cdot L \cdot \ln(h_1/h_2)}{A \cdot (t_2 - t_1)}$$

Sustituyendo los datos en la fórmula obtenemos un coeficiente de permeabilidad de $K = 1 \times 10^{-4}$ cm/seg.

Muestra 2. Arena fina bien graduada mezclada con estabilizador.



Longitud de la muestra. $L = 14$ cm.

Área de la sección transversal del tubo. $a = 11 \times 20$ cm. = 220 cm²

Nivel inicial del agua en el tubo al empezar el ensayo. $h_1 = 11$ cm.

Nivel final del agua en el tubo al finalizar el ensayo. $h_2 = 10$ cm.

Área transversal interna del cilindro. $A = 15 \times 20 \text{ cm} = 300 \text{ cm}^2$

Tiempo al iniciar el ensayo cuando el nivel de agua en el tubo esta en h_1 . $t_1 = 0$ segundos.

Tiempo al finalizar el ensayo cuando el nivel de agua está en h_2 . $t_2 = 138$ horas, 41 minutos, 42 segundos.

La conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad (k), es obtenida de la siguiente expresión:

$$k = \frac{a \cdot L \cdot \ln(h_1/h_2)}{A \cdot (t_2 - t_1)} = 293.55 / 149,790,600 = 0.00000196$$

Sustituyendo los datos en la fórmula obtenemos un coeficiente de permeabilidad de **$K = 1 \times 10^{-6}$ cm/seg.**

Muestra 3. Arena fina bien graduada mezclada con estabilizador y 2% de cal.



Longitud de la muestra. $L = 15$ cm.

Área de la sección transversal del tubo. $a = 11 \times 20 \text{ cm} = 220 \text{ cm}^2$

Nivel inicial del agua en el tubo al empezar el ensayo. $h_1 = 10$ cm.

Nivel final del agua en el tubo al finalizar el ensayo. $h_2 = 9$ cm.

Área transversal interna del cilindro. $A = 15 \times 20 \text{ cm} = 300 \text{ cm}^2$

Tiempo al iniciar el ensayo cuando el nivel de agua en el tubo esta en h_1 . $t_1 = 0$ segundos.

Tiempo al finalizar el ensayo cuando el nivel de agua está en h_2 . $t_2 = 161$ horas, 38 minutos, 56 segundos.

La conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad (k), es obtenida de la siguiente expresión:

$$k = \frac{a \cdot L \cdot \ln(h_1/h_2)}{A \cdot (t_2 - t_1)} = 347.69 / 174,580,800 = 0.00000199$$

Sustituyendo los datos en la fórmula obtenemos un coeficiente de permeabilidad de **$K = 1 \times 10^{-6}$ cm/seg.**



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

La arena limosa de baja plasticidad que fue ensayada en laboratorio a la compresión simple obtuvo una capacidad de carga de 7.01 Kg. /cm² en estado natural. Ese mismo suelo al ser estabilizado alcanzó una capacidad de carga de 17.65 Kg. /cm², es decir, incrementó en un 151.8 % su capacidad de carga. Con este último valor, el relleno sanitario mejorado en su nivel de desplante mediante la aplicación del estabilizador de suelos *Base - Seal*, tendría capacidad de soportar una carga de 176 metros de residuos sólidos considerando un peso volumétrico de éstos residuos de 1000 Kg. /m³ sin sufrir deformaciones ni fracturas que pusieran en riesgo al acuífero por las filtraciones de lixiviados.

Al realizar la prueba de permeabilidad a la arena fina bien graduada, se obtuvieron resultados relevantes, ya que la permeabilidad de la arena en estado natural alcanzó un coeficiente de conductividad hidráulica de 1×10^{-4} cm /seg., y combinando este suelo con el estabilizador *Base - Seal*, la conductividad hidráulica se redujo a 1×10^{-6} cm /seg., es decir, se redujo la permeabilidad 100 veces. El suelo ensayado con estabilizador y cal no mostró ninguna modificación o alteración y obtuvo el mismo coeficiente de permeabilidad de 1×10^{-6} cm /seg.

Con lo anterior se confirma la hipótesis en cuanto a que mediante la aplicación de un estabilizador de suelo al nivel de desplante de un relleno sanitario, se puede evitar asentamientos y deformaciones del terreno así como la filtración hacia el subsuelo y acuíferos de los lixiviados generados en un relleno sanitario.

De acuerdo a la granulometría realizada, se ensayó una arena mal graduada y al ser estabilizada con *Base - Seal* en la prueba de equivalente de arenas, se obtuvo un incremento en el porcentaje, por lo que se concluye que se mejoraron las características del suelo, eliminando la materia orgánica indeseada; aunque el incremento no fue significativo, para fines de experimentación podemos concluir que hubo una reacción del suelo con el estabilizador.

En la prueba de expansión se pudo observar que la arena mal graduada ensayada no era expansiva, por lo que la diferencia entre el suelo en estado natural y el estabilizado fue mínima; para el caso del suelo estabilizado el porcentaje de expansión fue casi nulo, por lo que podemos concluir que para esta prueba también presentó modificaciones el suelo al ser mejorado.

En la prueba de Valor Relativo de Soporte se obtuvieron resultados satisfactorios y relevantes. La arena mal graduada ensayada en estado natural tuvo un menor porcentaje de VRS en comparación con el estabilizado. Lo que significa que al mejorar la muestra con la aplicación del estabilizador, aumenta la resistencia a la compresión. El resultado obtenido en las pruebas cumple con las normas de la SCT e inclusive se puede utilizar este tipo de material ensayado en la base de una carretera. Lo que nos da un panorama claro de que se puede utilizar cualquier tipo de suelo en el proyecto de un relleno sanitario, ya que garantizará la resistencia a las cargas que se tengan en su vida útil. Es importante resaltar que este tipo de material ensayado no es recomendable para utilizarlo en la base estructural de algún camino, carretera o terraplén, sin embargo, al ser estabilizado alcanza porcentajes que cumplen con la norma y en un momento determinado puede utilizarse.

Se realizó granulometría a otro tipo de material dando como resultado una arena limosa de baja plasticidad. Los resultados obtenidos en las pruebas de compactación Proctor estándar que se realizaron con estabilizador y con cal, mostraron un incremento en cuanto a su peso volumétrico seco máximo. En estado natural se obtuvo el menor valor, y al mezclarlo con estabilizador y cal tuvo un mayor peso volumétrico, por lo que se concluye que mejora la resistencia del suelo. En cuanto a la humedad óptima se observó que al ensayar el suelo con estabilizador y cal, el contenido de humedad óptima se redujo un 6% en comparación con el suelo en estado natural. Este dato sí es representativo en los resultados, ya que alcanzó su contenido de humedad óptimo más rápido.



Con los mismos especímenes utilizados en las pruebas anteriores (arena limosa de baja plasticidad), se llevaron a la máquina de compresión con el objetivo de determinar la resistencia del terreno, en este caso de las muestras ensayadas. Los resultados fueron importantes ya que la resistencia del suelo al ser estabilizado soportó el doble de la carga con relación al suelo en estado natural, por lo que se incrementó la resistencia en forma considerable. Sin embargo, al ensayar el suelo con estabilizador y cal no aumentó la resistencia en comparación con el suelo estabilizado. Dicho lo anterior, podemos concluir que al estabilizar este tipo de suelo con *Base - Seal* aumenta en forma importante la resistencia del suelo. Al adicionar un porcentaje de cal no aumenta la resistencia en comparación con el suelo estabilizado.

De acuerdo a los resultados obtenidos en los experimentos realizados al combinar directamente el estabilizador *Base - Seal* con lixiviados, se concluye que los lixiviados al entrar en contacto con el estabilizador después de algunos minutos, altera su composición física, ya que cambia de líquido a gel; y después de 20 días de reposo, el volumen del gel se reduce en un 70%, perdiendo completamente todo el contenido de agua.

Es importante resaltar, que la arena ensayada en la prueba de permeabilidad, fue seleccionada por ser un suelo poroso y que permite el paso del agua más rápido, esto con la finalidad de obtener datos necesarios para realizar el cálculo del coeficiente de permeabilidad y comprobar el comportamiento del paso del lixiviado por un suelo completamente desfavorable y poco recomendable para la construcción de un relleno sanitario. Con los resultados obtenidos en dicha prueba, podemos concluir que el estabilizador de suelos es aplicable a una amplia gama de suelos y los mejora de forma satisfactoria.

Recomendaciones:

Se recomienda emplear para estabilizar el suelo, únicamente la aplicación del estabilizador *Base - Seal*, pues se demostró que al emplear la cal se incrementan los costos y no se mejora sensiblemente las propiedades del suelo para ser empleado como nivel de desplante de un relleno sanitario.

Se recomienda emplear una proporción de 1.6 litros de estabilizador diluidos en 48 litros de agua para cumplir con la proporción de 1:30. Esta proporción de estabilizador y agua se deben aplicar a un metro cúbico de suelo.

Los resultados obtenidos experimentalmente en laboratorio para el coeficiente de conductividad hidráulica fueron con una arena fina, por lo que se puede concluir que al ser mezclada con un 20% de material arcilloso o limoso, se cumplirá con la norma NOM-083-SEMARNAT-2003 de manera satisfactoria.

Se recomienda en suelos arenosos, agregar un 20% de finos para ayudar al estabilizador *Base - Seal* a que reaccione de manera más eficiente y se logren alcanzar valores que cumplan con la norma antes citada.



BIBLIOGRAFÍA

- Agudelo R. A. 1996, "Tratamiento de lixiviados producidos en el relleno sanitario Curve de Rodas de la ciudad de Medellín utilizando reactores UASB y filtros anaerobios FAFA", IV Seminario-Taller Latinoamericano sobre tratamiento anaerobio de aguas residuales, Bucalamanga, Colombia.
- Amokrane A., Comel C., Veron J. (1997). Landfill leachates pretreatment by coagulation flocculation. *Wat. Res.*, 31(11), pp 2775-2782.
- Andrews G., Tien Ch. (1975). The interactions of bacterial growth, adsorption and filtration in carbon columns treating liquid waste. *A. I. Ch. E Symp.*, 71, 164-175.
- Arriaga Soto J. Santos. Manual de prácticas de laboratorio. ESIA – ZACATENCO 2010
- Artiola FJ, Fuller HW. (1982). Humic substances in landfill leachates: I. humic acid extraction and identification. *J. Environmental Quality* 11(4), 663-669.
- Borzacconi L., López I., Ohanian M. y Viñas M., 1996, "Degradación anaerobia de lixiviado de relleno sanitario y post-tratamiento aerobio", IV Seminario-Taller Latinoamericano sobre tratamiento anaerobio de aguas residuales, Bucalamanga, Colombia.
- Borzacconi L., López I. y Anido C. (1996a). Metodología para la estimación de la producción y concentración de lixiviado de un relleno sanitario. XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. México D.F. 31 de octubre a 3 de noviembre, 1996. Tomo III.
- Borzacconi L., López I. y Arcia E., Cardelino L., Castagna A. y Viñas M. (1996b). Comparación de tratamientos aerobios y anaerobios aplicados a un lixiviado de relleno sanitario. XXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. México D.F. 31 de octubre a 3 de noviembre, 1996. Tomo I.
- Brunner D.H. y Keller D. J. "Sanitary Landfill Design and Operation" U.S. Environmental Protection Agency, 1992.
- Cossu R, Haarstad K., Lavagnolo M. y Littaru P., 2001, "Removal of municipal solid waste COD and NH₄-N by phyto - reduction: A laboratory - scale comparison of terrestrial and acuatic species at different organics loads", Elsevier Science Ltd.
- Crespo Villalaz Carlos. Mecánica de suelos y cimentaciones. 2007
- Cruz R., Orta M., Sánchez J. y Rojas M., 2001, "Estimación de la generación de lixiviados en rellenos sanitarios mediante un balance de agua en serie", Memorias del AMCRESPAC, Querétaro, México.
- Curso de profesionalismo en el manejo de los residuos sólidos municipales. Dirección Técnica de Residuos Sólidos. D.D.F. 1990.
- Ding A., Zhang Z., Fu J. y Cheng L., 2001, "Biological control leachate from municipal landfill", Elsevier Science Ltd.
- Dirección General de Servicios Urbanos, D.F. Estudio de comportamiento de un relleno sanitario mediante una celda de control. México, 1992.
- Durán de la Fuente H., Gestión Ambientalmente Adecuada de Residuos Sólidos, 1997.



- Durán, Ramírez, Durán Moreno. Bioadsorción de lixiviados viejos clarificados, 1997.
- Ehrig H. (1983). Quality and quantity of sanitary leachate. Waste Management Res., V 1, pp 53 - 58.
- Ehrig H. (1984). Treatment of sanitary landfill leachate: biological treatment. W. Mgmt., V 2, pp 131-152.
- Ehrig H., 1989, "Water and element balances of landfills", Earth Sciences, The Landfill, Springer-Verlag Press, USA.
- Ehrig H., 1999, "Cantidad y contenidos de lixiviados de rellenos de desechos domésticos", CEPIS/OPS.
- El-Fadel M., Bou-Zeid E., Chahine W. and Alayli B. (2002). Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content. Waste Management, 3(22), 269-282.
- Enzminger J.D., Robertson D., Ahlert R.C. y Kosson D.S. (1997). Treatment of landfill leachates. J. Hazard. Mater. 14, 83-101.
- Instituto Nacional de Ecología (1999), SEMARNAP. Minimización y manejo de los residuos sólidos. Diciembre.
- Jaramillo, Jorge, et al. Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales, una necesidad para pequeñas comunidades en México. Organización Panamericana de la salud – Secretaría de Salud. México, 1999.
- Juárez Badillo, Eulalio; Rodríguez, Alfonso R. - (1980) - Mecánica de los suelos TOMO I - Editorial LIMUSA, México.
- Juárez Badillo, Eulalio; Rodríguez, Alfonso R. - (1980) - Mecánica de los suelos TOMO III - Editorial LIMUSA, México.
- López Sánchez Felipe, Bleicher Sarmiento Conrado Aprovechamiento de Sitios de Disposición Final de Residuos Sólidos Municipales para la Generación de Energía Eléctrica, Primer Congreso Nacional de la Asociación Mexicana para la Economía Energética A.C.. Primera edición, México, D.F. 1995, ISBN 968-36-5444-4 pág. 359
- Manual de Operación y Mantenimiento de la Planta de Tratamiento de Lixiviados del Relleno Sanitario de Bordo Poniente, 2004.
- Mc. Bean, Edward A., Rovers, Frank A., y Farguhar. Grahame J. Diseño e Ingeniería de rellenos sanitarios de residuos sólidos. Prentice Hall. USA, 1995
- Mertens P., Richelle B., Watelet M., Wollast A. (1995). Audit technique de caractérisation d'une ancienne décharge: Composition d'un lixiviat particulier. T.S.M. L'eau, N 6, pp 465-470.
- M. T. Orta. Disposición final de Residuos Sólidos Municipales en Rellenos Sanitarios, 2005
- Niininen M., Kalliokoski P. y Parjala E. (1995). Quality of landfill leachates and their effect on groundwater. Waste Disposal by Landfill (GREEN'93). Rotterdam.



NOM-083-SEMARNAT-2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. 20 de Octubre de 2004.

Normas de la secretaría de comunicaciones y transportes 2000.

Orta M., Ramírez Z., Monje I., Torres L., Díaz V. (1997). Sustitución y disminución del consumo de reactivos químicos en la planta de tratamiento de lixiviados de Bordo poniente. Informe elaborado por el Instituto de Ingeniería, UNAM. Proyecto 7365.

Ozzane F. (1990). Les lixiviats de décharges le point des connaissances en 1990. T. S. M. No 6, Juin, pp 289-300.

Price, M. Agua Subterránea. México, 2003.

Publicaciones del Instituto Nacional de Ecología / SEMARNAT Estadísticas e Indicadores de Inversión sobre Residuos Sólidos Municipales en los Principales Centros Urbanos de México, México D.F. 1997.

Qasim RS, Chiang W. (1994) Sanitary landfill leachate: generation, control and treatment. Lancaster, Pennsylvania, Technomic Publ.

Rice R., Miller G., Robson C., Kuhn W. (1977). Biological activated carbon. 6th Inter. Assoc. Water Poll. Res. Congress, Jerusalem, Israel, June.

Rodríguez F., Iza L., Ruiz R. (1997). Lixiviados en vertederos de R. S. U.: Generación, control y tratamiento. Dpt. Ing. Química y medio ambiente, Escuela de Ingeniería, Universidad del país Vasco.

Schrab G. E., Brown K., Donnelly K. (1993). Acute and genetic toxicity of municipal landfill leachate. Water, air and soil pollution control., 69(1-2), pp 99-102.

SEDESOL. Dirección General de Equipamiento e Infraestructura en Zonas Urbano-Marginadas. México. 2005.

SEDUE. "Manual de relleno sanitario", 1993

SEMARNAT. Estadísticas del Medio Ambiente. México. 1997.

Tammemagi H. The Waste Crisis: Landfills, incinerators and the search for a sustainable future. U.S.A., 1999.

Tchobanoglous G., Thiesen H. A. Gestión Integral de los Residuos Sólidos. Volumen I. Editorial Mc. Graw Hill, 1994.

Tchobanoglous G., Thiesen H. A. VIGIL S. Gestión Integral de los Residuos Sólidos. Volumen I. Editorial Mc. Graw Hill, Madrid, España, 1998.

Trebouet D., Schlumpf J. P., Jaouen P. and Quemeneur F. (2001). Stabilized landfill leachate treatment by combined physicochemical: nanofiltration processes. Wat. Res., 12(35), 2935–2942.

Trejo - Vázquez R., Procesamiento de la Basura Urbana, Edit. Trillas México. (1997)



Vázquez M. Oscar., Clausura y Saneamiento del Ex tiradero de Basura, Construcción y Operación del Relleno Sanitario de Tlalnepantla de Baz, Estado de México. Congreso expo AMCRESPAC, 2001. Memoria Querétaro. Noviembre 2001

Vernier, J. Traducción de Robles García. El Medio Ambiente. México, 1992.

Vidales Albarran H. Generación y cuantificación de biogás en rellenos sanitarios, Asociación Mexicana para el Control de los Residuos Sólidos Peligrosos A.C., México, Septiembre-Octubre 1994, Tomo 1 Vol. 8

FUENTES CONSULTADAS:

<http://www.baseseal.com/page1.htm>

<http://www.arqhys.com/arquitectura/sanitarios-rellenos.html>

http://www.cepis.org.pe/eswww/tecapropiada/desinfec/rellenos_sanitarios.htm

ftp://ftp.fao.org/fi/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm

http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/estudiantes/dlilian/marco_4.htm

http://bvsde.per.paho.org/curso_rsm/e/unidad3.html#i1

<http://www.elsevier.com/locate/ecoleng>.

<http://es.wikipedia.org/wiki/Coliforme>

<http://www.epa.gov/espanol/>

<http://www.sma.df.gob.mx/simat/pnozono.htm#materiales>

<http://www.planetaazul.com.mx/site/>

http://www.sagan-gea.org/hojared_AGUA/paginas/25agua.html

<http://www.structroad.com/>

<http://ceamse.gov.ar/que-es-ceamse/>

http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/cd_compendio08/compendio_2008/03_residuos2.html

<http://www.pdf-search-engine.com/estructura-relleno-sanitario-pdf.html>

http://gemini.udistrital.edu.co/comunidad/estudiantes/dlilian/marco_4.htm

http://www.consorcioambiental.com/subpages/legislacion/norma_semar.htm

http://www.ceamamorelos.gob.mx/secciones/ambiente/residuos_solidos.html

http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen/08_residuos/cap8.html



GLOSARIO

Acuífero

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

Acuífardo

Es una formación geológica similar al acuífero, que contiene apreciables cantidades de agua, pero éste debido a su permeabilidad, la transmite muy lentamente, como fuente de recarga, hacia otros acuíferos.

Acuícludo

Es una formación geológica compuesta de arcilla (muy baja permeabilidad) que, conteniendo agua en su interior incluso hasta la saturación, no la transmite.

Acuífugo

Esta es una formación geológica subterránea, que se caracteriza por no tener intersticios interconectados, es decir, que los espacios vacíos entre partículas no están conectados entre sí, por lo tanto, es incapaz de absorber agua y mucho menos transmitirla.

Agua subterránea

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

Disposición final

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

Escorrentía

Escorrentía llamada también escurrimiento, es una corriente de agua que no se infiltra en el suelo, sino que corre por encima de la superficie terrestre hasta formar parte de los ríos, lagos y finalmente llegar al mar.

Flujo de agua

Se considera flujo de agua, a una corriente de agua que pasa a través de un medio poroso saturado de agua, donde las partículas de agua se mueven como conjunto de una altura total de carga mayor a una menor.

Infiltración

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

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.

Nivel freático

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

Percolación

Es el movimiento descendente de agua a través del perfil del suelo debido a la influencia de la gravedad y que pasa a través de un medio poroso.



Permeabilidad

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

Residuo sólido municipal

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

Talud

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

Relleno Sanitario. Obra de Infraestructura que involucra métodos y Obras de Ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructura adicional, los impactos ambientales.

Residuos Sólidos Urbanos: Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos.



ANEXOS

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S.) INCLUYENDO IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN

DIVISIÓN MAYOR		SÍMBOLO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN EN EL LABORATORIO					
SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 ⊕	Las partículas de 0.074 mm de diámetro (la malla No.200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4 PARA CLASIFICACIÓN VISUAL PUEDE USARSE 1/2 cm. COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	GW Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Cu: mayor de 4. COEFICIENTE DE CURVATURA Cc: entre 1 y 3. $Cu = D_{60} / D_{10}$ $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$					
			GP Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACIÓN PARA GW.				
			<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">* GM</td> <td style="text-align: center;">d u</td> <td style="text-align: center;">Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo</td> </tr> </table>			* GM	d u	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4.
			* GM			d u	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo		
			GC Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla			Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.			
			SW Arenas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.		LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.				
		SP Arenas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	Cu = D ₆₀ / D ₁₀ mayor de 6 ; Cc = (D ₃₀) ² / (D ₁₀)(D ₆₀) entre 1 y 3.						
		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">* SM</td> <td style="text-align: center;">d u</td> <td style="text-align: center;">Arenas limosas, mezclas de arena y limo.</td> </tr> </table>		* SM	d u	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW		
		* SM	d u	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.					
		SC Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4.						
ML Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.	LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.								
CL Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.		Arriba de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.							
OL Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.	LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4.								
MH Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos.		LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.							
CH Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.	No satisfacen todos los requisitos de graduación para SW								
OH Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad.		LÍMITES DE ATTERBERG ABAJO DE LA "LÍNEA A" O I.P. MENOR QUE 4.							
P Turbas y otros suelos altamente orgánicos.	LÍMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LÍNEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7.								
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS		G – Grava, S – Arena, O – Suelo Orgánico, P – Turba, M – Limo C – Arcilla, W – Bien Graduada, P – Mal Graduada, L – Baja Compresibilidad, H – Alta Compresibilidad							
SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 ⊕	LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido menor de 50		LIMOS Y ARCILLAS Límite Líquido Mayor de 50	SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS	<div style="text-align: center;"> CARTA DE PLASTICIDAD (S.U.C.S.) </div>				

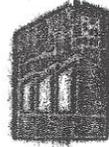
** CLASIFICACIÓN DE FRONTERA- LOS SUELOS QUE POSEAN LAS CARACTERÍSTICAS DE DOS GRUPOS SE DESIGNAN CON LA COMBINACIÓN DE LOS DOS SÍMBOLOS; POR EJEMPLO GW-GC. MEZCLA DE ARENA Y GRAVA BIEN GRADUADAS CON CEMENTANTE ARCILLOSO.

⊕ TODOS LOS TAMAÑOS DE LAS MALLAS EN ESTA CARTA SON LOS U.S. STANDARD.

* LA DIVISIÓN DE LOS GRUPOS GM Y SM EN SUBDIVISIONES d y u SON PARA CAMINOS Y AEROPUERTOS UNICAMENTE, LA SUB-DIVISIÓN ESTA BASADA EN LOS LÍMITES DE ATTERBERG EL SUFIIJO d SE USA CUANDO EL L.L. ES DE 28 O MENOS Y EL I.P. ES DE 6 O MENOS. EL SUFIIJO u ES USADO CUANDO EL L.L. ES MAYOR QUE 28.



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
 UNIDAD ZACATENCO



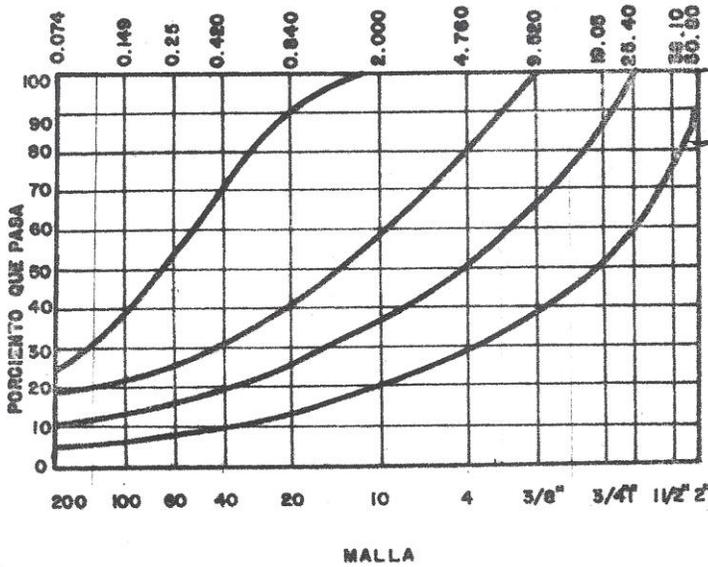
LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y TERRACERIAS

①

GRANULOMETRIA POR MALLAS

OBRA _____					PESO DE LA MUESTRA _____				
LOCALIZACION _____					RECIPIENTE NUM. _____				
ENSAYE NUM. _____		SONDEO NUM. _____			PESO RECIP. \pm SUELO HUMEDO (g) _____				
MUESTRA NUM. _____		PROF. _____			PESO RECIP. \pm SUELO SECO (g) _____				
DESCRIPCION _____					PESO AGUA (g) _____				
FECHA _____					PESO RECIPIENTE (g) _____				
OPERADOR _____					PESO MUESTRA SECA (g) _____				
CALCULO _____					CONTENIDO DE HUMEDAD (%) _____				
MALLA NUM.	ABERTURA	PESO SUELO RETENIDO	POR CIENTO RETENIDO PARCIAL	POR CIENTO QUE PASA	MALLA NUM.	ABERTURA	PESO SUELO RETENIDO	POR CIENTO RETENIDO PARCIAL	POR CIENTO QUE PASA
	mm	g	%	%		mm	g	%	%
2"	50.80				10	2.000			
1 1/2"	38.10				20	0.840			
1"	25.40				40	0.420			
3/4"	19.05				60	0.250			
1/2"	12.70				100	0.149			
3/8"	9.52				200	0.074			
NUM. 4	4.76				PASA 200				
PASA NUM. 4					SUMA				
SUMA									

GRAFICA DE COMPOSICION GRANULOMETRICA



D_{10} = _____
 D_{30} = _____
 D_{60} = _____

DIAMETRO EN mm

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

$v_{3"}$ = _____ %
 6 = _____ %
 8 = _____ %
 F = _____ %

CLASIFICACION SUCS. _____
 OBSERVACIONES @ SM _____

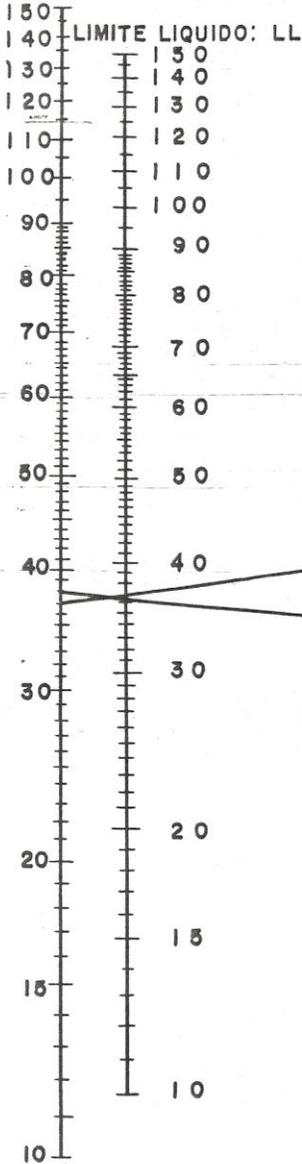


LABORATORIO DE
IPN **ESIA**
 PAVIMENTOS Y TERRACERIAS

PROCEDENCIA _____
 ESTUDIO A EFECTUAR _____
 DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA _____
 FECHA INIC. _____ FECHA TERM. _____
 ENSAYE N.º _____ LABORATORISTA _____

HUMEDAD DE
 LA MUESTRA: W_N

LIMITE LIQUIDO: LL



$$LL = W_N \left(\frac{N}{25} \right)^{0.12}$$

NUMERO
 DE GOLPES: N

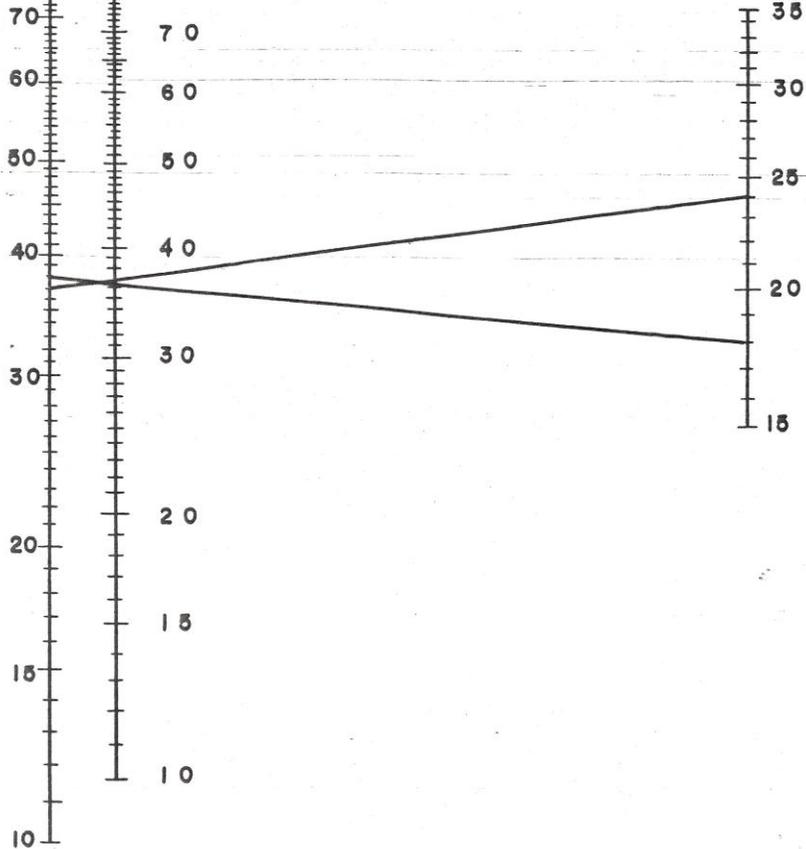
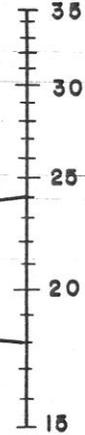


FIGURA N° GRAFICA PARA CALCULAR EL
 LIMITE LIQUIDO DE LOS SUELOS



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

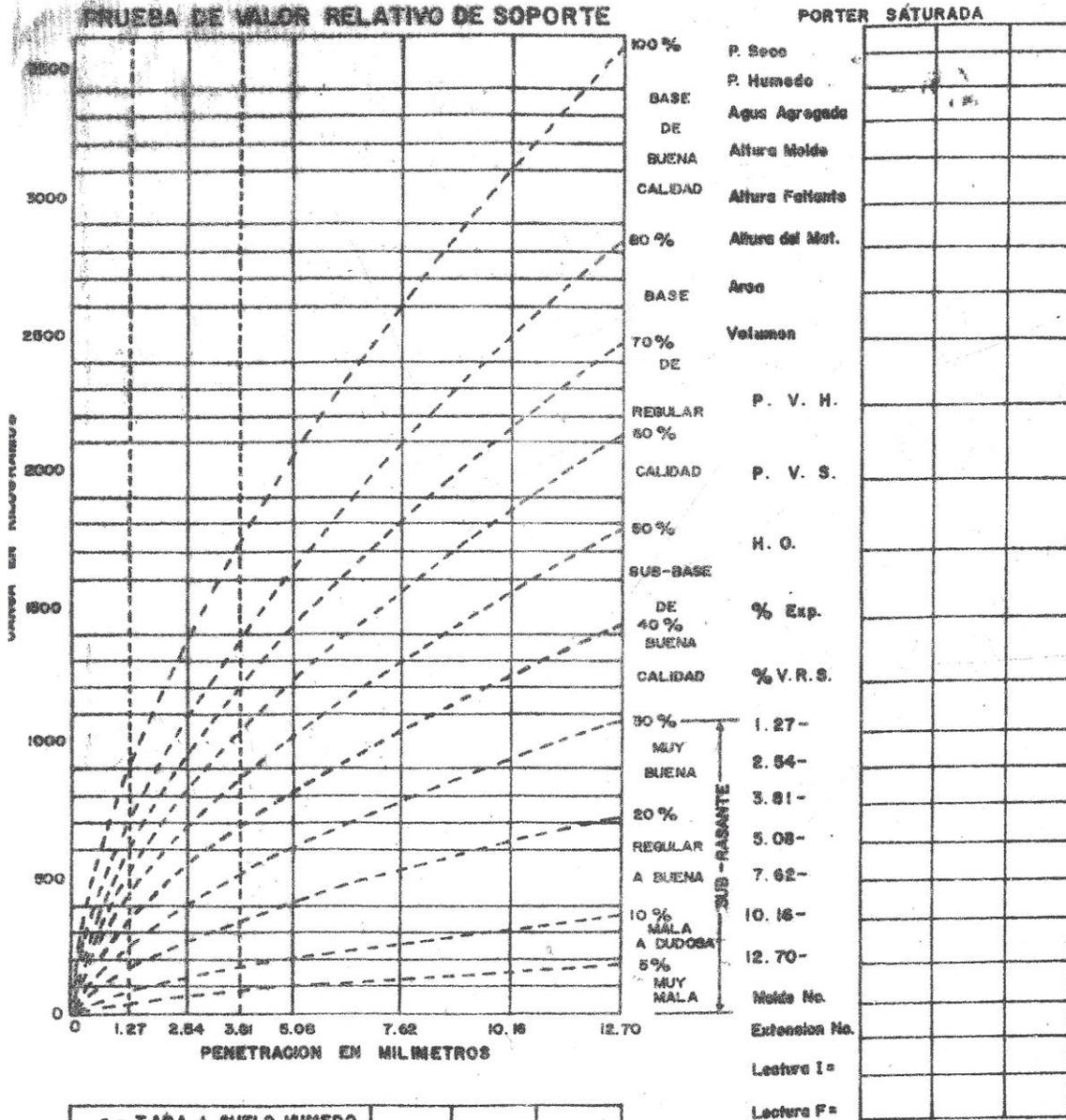
UNIDAD ZACATENCO

LABORATORIO DE PAVIMENTOS Y TERRASERIAS

ENSAJE _____

OPERADOR _____

FECHA _____



a - TARA + SUELO HUMEDO					
b - TARA + SUELO SECO					
c - TARA					
d - CONTENIDO DE AGUA a-b					
e - SUELO SECO b-c					
f - % DE HUMEDAD $\frac{d}{e}$					