



Guía para la revisión de proyectos ejecutivos, planes de regularización o evaluación de la conformidad según la NOM-083-SEMARNAT-2003

Guía para la revisión de proyectos ejecutivos, planes de regularización o evaluación de la conformidad según la NOM-083-SEMARNAT-2003



gtz

México 2007

Ing. Juan Elvira Quesada

Secretario de Medio Ambiente y Recursos Naturales – SEMARNAT

Ing. Sandra Denisse Herrera Flores

Subsecretaria de Fomento y Normatividad Ambiental – SEMARNAT

Lic. Luís Felipe Carrillo Neri

Director General de Fomento Ambiental Urbano y Turismo – SEMARNAT

Ing. Axel Macht

Asesor Principal de Gestión de Residuos y Sitios Contaminados

Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH

AUTORES:

Pablo Heredia Cantillana

Jorge Sánchez Gómez

Marcos Rodríguez Salinas

Rodrigo Aguilar Vera

Agradecemos el esfuerzo de revisión y contribución a este texto a: Ing. Inés Semadeni Mora (Sistemas de Ingeniería Ambiental), Ing. Arturo Dávila Villareal (SUSTENTA A.C.), Ing. Onésimo Constantino Blanco (Proactiva S.A de C.V.), Ing. Myriam Velasco Pérez (Semarnat-Nayarit), Ing. Dinorah Guerrero Lecona (Gob. del Estado de Querétaro), Ing. Hugo García Gómez (Instituto de Historia Natural y Ecología – Gob. del Estado de Chiapas) y a todos los miembros de la RED GIRE SOL.

Primera edición: Enero del 2007

© Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007

© Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, 2007

Se autoriza la reproducción parcial o total, citando la fuente de referencia.

Se agradece el apoyo del Gobierno Alemán a través del Ministerio de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ)

ISBN: 970-9983-08-3

Contenido	
Lista de Cuadros	III
Lista de Figuras	III
Abreviaturas	V
 INTRODUCCIÓN	 1
Objetivos	3
 1 DESCRIPCIÓN DE LAS RESTRICCIONES PARA LA UBICACIÓN DEL SITIO	 4
1.1 Aeropuertos	4
1.2 Áreas naturales protegidas	5
1.3 Distancias urbanas	6
1.4 Zonas especiales	6
1.5 Zonas de inundación	9
1.6 Cursos de agua	10
1.7 Pozos	10
 2 ESTUDIOS Y ANÁLISIS PREVIOS PARA LA SELECCIÓN DEL SITIO.	 13
2.1 Estudio geológico	14
2.2 Estudio hidrogeológico.	18
2.3 Estudios y análisis, en el sitio, previos a la construcción y operación de un SDF	21
 3 ESTUDIOS DE GENERACIÓN Y COMPOSICIÓN	 36
3.1 Generación y composición de los RSU y RME	36
3.2 Generación de biogás	41
3.3 Generación de lixiviado	48
 4 CARACTERISTICAS CONSTRUCTIVAS Y OPERATIVAS DEL SDF	 53
4.1 Impermeabilización	53
4.2 Manejo de biogás	58
4.3 Manejo de lixiviado en el SDF	66
4.4 Procesos para el tratamiento y control de los lixiviados	70
4.5 Manejo de aguas lluvias (escorrentía superficial)	75
4.6 Área de emergencia	77
4.7 Densidad de compactación	79
4.8 Control en la operación	81
4.9 Control de ingreso	83
4.10 Obras complementarias	85
4.11 Documentos permanentes requeridos en el SDF	87
4.12 Control de registro	91
4.13 Programa monitoreo ambiental	93
4.14 Recuperación de materiales reciclables en el SDF	95

5	REQUISITOS MÍNIMOS QUE DEBEN CUMPLIR LOS SDF, TIPO D (MENOS DE 10 TONELADAS DIARIAS)	97
5.1	Impermeabilización para SDF tipo D	97
5.2	Compactación de los residuos	97
5.3	Cobertura de los residuos	98
5.4	Control de ingreso de residuos peligrosos	98
5.5	Control de fauna nociva	98
5.6	Cerco perimetral	98
6	CLAUSURA DEL SDF	99
6.1	Cobertura final del SDF	99
6.2	Conformación final del sitio	100
6.3	Mantenimiento posclausura.	101
6.4	Programa de monitoreo.	101
6.5	Uso final del SDF	103
	BIBLIOGRAFÍA	104
	GLOSARIO	105

Lista de Cuadros

Cuadro 1. Resumen de puntos críticos en el cumplimiento de las restricciones de ubicación de un SDF.	12
Cuadro 2. Técnica de perforación recomendada para distintos tipos de suelo.	25
Cuadro 3. Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (SUCS).	28
Cuadro 4. Valores típicos de ángulos de reposo para materiales selectos.	33
Cuadro 5. Índice de generación de residuos por habitante.	37
Cuadro 6. Índice de generación de residuos de diversas actividades metropolitanas.	37
Cuadro 7. Normas Mexicanas relacionadas con los residuos sólidos.	41
Cuadro 8. Resumen del balance estequiométrico para la generación de biogás.	45
Cuadro 9. Principales tipos de textura de material y sus coeficientes de conductividad hidráulica.	55
Cuadro 10. Parámetros recomendados para materiales impermeables.	55
Cuadro 11. Porcentaje de captación de biogás.	59
Cuadro 12. Requerimientos para la construcción de chimeneas.	61
Cuadro 13. Comparación entre incineración en chimenea y antorcha.	64
Cuadro 14. Criterios de selección de grava o piedra bola para capa drenante.	66
Cuadro 15. Problema y propuesta de solución para la recepción de residuos y circulación de vehículos en clima adverso.	78
Cuadro 16. Criterio de selección de material de acuerdo al uso.	82
Cuadro 17. Dimensiones típicas de los servicios al personal de un SDF.	86
Cuadro 18. Parámetros y características de un lixiviado.	94
Cuadro 19. Frecuencia recomendada para la realización de análisis a lixiviados y biogás.	102

Lista de Figuras

Figura 1. Superficies de aproximación requeridas para la operación de aeronaves con motores de turbina y de pistón.	5
Figura 2. Impactos que genera un SDF mal operado en zonas de alta diversidad biológica.	6
Figura 3. Residuos dispuestos en un humedal.	7
Figura 4. Superficie de inundación asociada al lecho de un río.	7
Figura 5. Potencial afectación de las aguas subterráneas en una formación cárstica.	8
Figura 6. Vista aérea de las Ruinas de Xochicalco, cercanas al SDF de Tetlama, Morelos.	8
Figura 7. SDF de Residuos alojado en parte, en la zona de inundación de una corriente superficial.	9

- IV -

Figura 8. Distancia mínima desde el SDF a un pozo de extracción de agua.	11
Figura 9. Ejemplo de un acuífero libre y uno confinado.	20
Figura 10. Ejemplo de un acuífero semi-confinado.	20
Figura 11. Formas tipo de SDF.	23
Figura 12. Pozo para la medición de la permeabilidad k_m del suelo por el método del CIUSA.	26
Figura 13. Esquema del ensayo de Permeabilidad.	30
Figura 14. Fases de la generación de gases en la estabilización de los RSU en un SDF.	42
Figura 15. Recomendación para la instalación de las láminas de HDPE sobre la base.	57
Figura 16. Soldadura recomendada para unión de laminas HDPE.	57
Figura 17. Modelo de filtro biológico para la evacuación de biogás del SDF.	59
Figura 18. Cobertura de compost utilizada como filtro biológico.	60
Figura 19 Chimenea con malla y puntales para drenaje pasivo de biogás.	62
Figura 20. Chimenea con tambor para drenaje pasivo de biogás.	62
Figura 21. Instalación de tubo de quema de biogás.	63
Figura 22. Sistema de tubería al interior de las celdas para el sistema de drenaje activo.	63
Figura 23. Esquema de antorcha convencional.	65
Figura 24. Posición del tubo de captación y conducción de lixiviado dentro de la capa drenante.	67
Figura 25. Características de los drenes para la captación y conducción de los lixiviados.	68
Figura 26. Colocación de tubería de captación y conducción de lixiviado según sistema “espina de pescado”.	68
Figura 27. Canal de drenaje de lixiviados.	69
Figura 28. Canal de drenaje construido con neumáticos en desuso.	70
Figura 29. Balance hídrico para el calculo de producción de lixiviado.	70
Figura 30. Relación entre el espesor de la capa de residuos sólidos y la densidad relativa compactada del SDF (cuadro representativo, las variaciones de densidad dependen del tipo de máquina).	80
Figura 31. Impacto del numero de pasadas sobre la densidad relativa del SDF (cuadro representativo, las variaciones de densidad dependen del tipo de máquina).	80
Figura 32. Malla movil para el control de materiales ligeros en ele frente de trabajo.	81
Figura 33. Geometrías de SDF estables.	88
Figura 34. Geometrías de SDF inestables.	89
Figura 35. Rango de explosividad del gas metano.	93
Figura 36. Diseño de cobertura final.	99

Abreviaturas

AAE	Autoridades Ambientales Estatales
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
GTZ	<i>Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.</i> Cooperación Técnica Alemana
NMX	Norma Mexicana
NOM	Norma Oficial Mexicana.
PEC	Procedimiento de evaluación de la conformidad
PR	Plan de regularización
RME	Residuo de Manejo Especial
RSU	Residuo Sólido Urbano
SDF	Sitio de Disposición Final
SEDESOL	Secretaría de Desarrollo Social
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
UV	Unidad Verificadora

Introducción

La cantidad de residuos sólidos generados en México ha tenido un aumento importante durante las últimas décadas. La estimación sobre la cantidad de residuos generados por persona sea ha duplicado en el transcurso de los últimos 50 años. Este crecimiento sostenido en la generación de residuos, principalmente en las regiones con un alto desarrollo industrial y urbano, ha derivado en importantes impactos que recaen sobre la población, en la organización, infraestructura y finanzas de quienes son responsables del manejo de los residuos (Municipios y empresas privadas) así como también sobre el medio ambiente natural (agua, suelo y aire).

Estos efectos tienen una influencia directa con el desarrollo social, económico y de infraestructura de las comunidades. La autoridad ambiental, conciente de la necesidad de hacer frente al replanteamiento de las condiciones básicas para la disposición adecuada de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, publicó el 10 de octubre del 2004 la NOM-083-SEMARNAT-2003 (NOM 083); estableciendo con ésta las especificaciones de protección ambiental para la selección, diseño, construcción, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final (SDF) de residuos sólidos urbanos (RSU) y residuos de manejo especial (RME).

La presente guía se ha elaborado con la finalidad de instruir, informar y orientar a los profesionales de las Autoridades Ambientales Estatales (AAE), encargados de la evaluación y aprobación de los planes de regularización (PR), proyectos ejecutivos presentados por los municipios y/o empresas privadas, como también del control y vigilancia del cumplimiento de la NOM 083 en todos los aspectos técnicos involucrados. Por otra parte, esta publicación pretende servir de instrumento guía a otros profesionales que trabajan en el sector así como también a las unidades de verificación (UV) que puedan desempeñarse en el área.

Actualmente el SDF es la tecnología más utilizada para la disposición final en México y el mundo, lo anterior debido a que ha demostrado ser un método relativamente económico, de fácil ejecución y eficaz en la prevención y protección de riesgos sanitarios, por esa razón es aceptado y utilizado por diversas empresas y municipios, quienes han logrado la experiencia necesaria en su utilización. Sin embargo, a pesar de su aparente simplicidad, el desarrollo de un proyecto de este estilo necesita conocimientos específicos sobre temas de ingeniería y administración de recursos en áreas como: geología, hidráulica, bioquímica, mecánica, monitoreo ambiental, entre otros. Es por esto, que la entrega de parámetros referenciales para los evaluadores y controladores de este tipo de infraestructura, son esenciales para discernir entre proyectos ejecutivos viables, que se ejecutan y monitorean correcta y adecuadamente, de aquellos que no cumplen con la normatividad actual vigente.

Asimismo la presente herramienta pretende ser un complemento para la evaluación de aquellos SDF que deben ser reglamentados, tanto tiraderos a cielo abierto como los controlados, priorizando las exigencias contenidas en la NOM 083, como por ejemplo:

La minimización de las molestias e impactos a la salud de la población del SDF. Siendo el punto fundamental la ubicación de las instalaciones.

Una adecuada protección ambiental. La instalación debe contar con la infraestructura básica: impermeabilización (natural o artificial), drenaje, evacuación y tratamiento de líquidos lixiviados y gases, entre otras medidas.

Características adecuadas de costo y eficiencia. En donde un buen diseño y operación se traduce en menores costos de operación y mantenimiento, pudiendo lograr la mayor vida útil posible ocupando los recursos humanos y técnicos de la mejor forma.

Planeación y control del SDF. El monitoreo y control adecuados son las mejores herramientas para prever un mal funcionamiento, establecer medidas preventivas y correctivas y preparar al SDF para su etapa de cierre y postclausura.

Como ya se ha explicado en publicaciones anteriores, la NOM 083 establece los mecanismos para que los SDF operen como SDF. Es así que existen tres procedimientos importantes para tomar en cuenta:

Que todos los SDF (SDF o no) en funcionamiento al momento de entrada en vigor de la NOM 083 deben someterse a la realización de un plan de regularización (PR), el cual podrá determinar: a) que cumple con la normatividad vigente y puede continuar sus operaciones sin variaciones, b) que a través de un plan de regularización de rehabilitación logrará cumplir con la NOM 083, y c) que en caso de que el SDF no sea susceptible a ser rehabilitado, se deberá proceder a su clausura en un periodo que no sobrepase los 18 meses en tiraderos a cielo abierto o de 24 meses para sitios controlados. Normalmente estos plazos se cuentan desde el momento de la aprobación del PR por parte de la AAE, siempre y cuando estos PR se hayan presentado dentro del plazo estipulado en la NOM 083 (hasta el 19/12/2005) o de las prórrogas que hayan podido ser emitidas por las entidades federativas. En caso de que los PR hayan sido presentados fuera de los plazos estipulados en la NOM, las AAE podrán exigir su clausura en los tiempos que establezcan según sus propios criterios.

Posterior a la entrada en vigor de la NOM 083, los proyectos deben ser presentados, aprobados, construidos y operados conforme a la misma y a los procedimientos establecidos en los propios Estados que no vayan en contraposición con la NOM 083.

Una vez que los SDF hayan sido regularizados o bien, aprobados y construidos después de la entrada en vigor de la NOM 083, podrán someterse al Procedimiento de Evaluación de la Conformidad (PEC), cuyo objetivo es la obtención del Dictamen de Cumplimiento de la Norma Oficial Mexicana, ya sea en la etapa de construcción, operación y/o clausura del SDF. Se recomienda realizar este procedimiento cada 2-3 años para asegurarse del cumplimiento de la NOM 083.

Tanto los PRs como los proyectos ejecutivos de nuevos SDF deben ser realizados por profesionales idóneos y con experiencia en la planificación de este tipo de infraestructuras, en cualquier caso este factor queda a criterio de los municipios o las

empresas privadas encargadas del proyecto. Las Unidades de Verificación (UV) podrán ser las encargadas de la realización de los PEC.

Para la elaboración de esta publicación se utilizaron datos bibliográficos de destacadas y reconocidas fuentes nacionales e internacionales, experimentadas en el diseño, operación y clausura de SDF.

Agradecemos profundamente el apoyo y la valiosa ayuda de todos aquellos profesionales y expertos del área que aportaron con comentarios y reflexiones para el enriquecimiento del presente texto.

También agradecemos encarecidamente al esforzado y dedicado trabajo de los miembros de la Red Nacional de Promotores para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos (RED GIRE SOL) para la difusión de estos conocimientos y su utilización directa con los municipios en todos los estados de la República Mexicana.

Objetivos

Que las autoridades encargadas de la evaluación de planes de regularización, proyectos ejecutivos de SDF según la NOM 083 y los procedimientos de evaluación de la conformidad, que culminaron en la entrega de un Dictamen de Verificación por parte de una UV acreditada; conozcan los alcances técnicos y tengan herramientas de valoración y comparación para los puntos presentes en la NOM 083 en sus procesos de aprobación de proyectos.

Establecer recomendaciones y parámetros de referencia para los puntos técnicos críticos de la NOM 083, para los profesionales evaluadores (UV entre otros) y proyectistas.

1 Descripción de las restricciones para la ubicación del sitio

Esta sección es crítica para determinar la ubicación del SDF. El proyecto ejecutivo de un sitio nuevo debe de cumplir con todas las restricciones ya estas son las mínimas necesarias para limitar los impactos al medio ambiente, así como resguardar la integridad de la instalación. Para el caso de planes de regularización se parte del hecho que ya existe una cantidad considerable de residuos depositados y por tal motivo la decisión se toma en el sentido de continuar depositando o clausurarlo; puede consultarse también la “Guía para la elaboración de planes de regularización de acuerdo a la NOM-083-SEMARNAT-2003” de esta misma serie. La norma ofrece la posibilidad de su cumplimiento demostrando que la obra de infraestructura cumple con la misma función (un objetivo fundamental de esta guía), sin embargo, en muchos de casos de esta sección esto no es posible. Al final del capítulo se presenta un cuadro con el resumen de los puntos críticos para cada restricción.

1.1 Aeropuertos

6.1.1 Cuando un sitio de disposición final se pretenda ubicar a una distancia menor de 13 kilómetros del centro de la(s) pista(s) de un aeródromo de servicio al público o aeropuerto, la distancia elegida se determinará mediante un estudio de riesgo aviario

El espacio aéreo del SDF, se exige cierta distancia mínima a cualquier lugar de aterrizaje o despegue de aeronaves. En caso de que el sitio se encuentre a una distancia menor, será un profesional o especialista el encargado de realizar un estudio aviario que contenga la aprobación de las autoridades de aviación correspondiente.

El estudio aviario debe considerar el cono de aproximación y el espacio de influencia de las aves observadas, el cual define ciertas áreas y superficies para el ascenso y descenso de las aeronaves. Tanto el espacio de influencia de las aves como el área del cono de aproximación no deben interferirse uno con otro.

Definiremos básicamente el espacio de influencia de las aves como el área que comprende el lugar alrededor del nido donde las aves se proveen de alimento (en este caso el SDF). Esta área depende de la especie, variando para cada una la distancia y la altura de vuelo.

El cono de aproximación demanda distintas distancias de aproximación dependiendo del ancho de pista. Para el caso de un ancho de pista de 300 mts se requiere una longitud de 13 kilómetros, en cuyo horizonte no deben aparecer obstáculos móviles y/o fijos que puedan afectar la circulación de las aeronaves. Las pistas de menor tamaño requieren conos de aproximación menores. En la siguiente figura se puede observar las distintas conformaciones de conos de aproximación para diferentes anchos de pista.

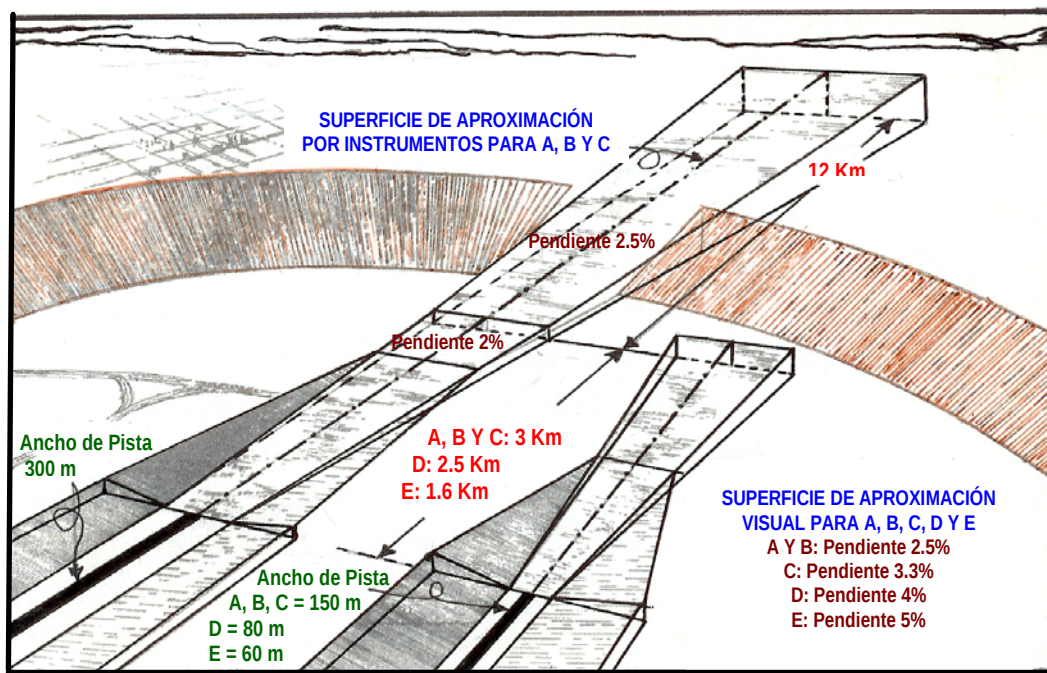


Figura 1. Superficies de aproximación requeridas para la operación de aeronaves con motores de turbina y de pistón.

1.2 Áreas naturales protegidas

6.1.2. No se deben ubicar sitios dentro de áreas naturales protegidas, a excepción de los sitios que estén contemplados en el Plan de manejo de éstas.

Las áreas naturales protegidas (ANP) son aquellas que no han sido perturbadas significativamente y han sido decretadas oficialmente. El conocimiento acerca de áreas con un ambiente diverso y de alta importancia por los servicios ambientales que brinda, es fundamental para su protección. Los SDF por la naturaleza de esta infraestructura pueden crear grandes impactos negativos al ambiente por lo que es fundamental evitar la instalación de estas obras al interior o en la cercanía de las ANP. Cualquier eventualidad puede alterar o degradar el equilibrio ecológico que ha demorado en algunos casos miles de años en crearse.

La problemática social en algunos casos requiere en algunos casos de la construcción de SDF dentro de las ANP. Para que esto sea posible es necesario que el plan de manejo de la ANP considere al SDF. El plan de manejo es un instrumento programático que permite aprovechar, proteger, conservar y restaurar el ANP, y representa su eje rector. También es necesario que el estudio de impacto ambiental considere con mayor énfasis el medio ambiente natural, foco central de la protección.



Figura 2. Impactos que genera un SDF mal operado en zonas de alta diversidad biológica.

1.3 Distancias urbanas

6.1.3. En localidades mayores de 2.500 habitantes, el límite del sitio de disposición final debe estar a una distancia mínima de 500 m (quinientos metros) contados a partir del límite de la traza urbana existente o contemplada en el plan de desarrollo urbano.

La distancia mínima establecida por la Norma entre el límite del SDF y la población busca generar un perímetro de seguridad frente a una contingencia que se produzca en el SDF; esta distancia es de 500 m. del límite de la traza urbana. Los planes de desarrollo urbano establecen este límite urbano y en muchos casos incluyen áreas específicas de construcción de obras de infraestructuras de este tipo.

En los casos que no existan instrumentos programáticos para el desarrollo urbano, se recomienda considerar el límite de la traza urbana aquella zona que tenga una densidad poblacional de 2 viviendas por hectárea.

La correcta operación de un SDF no genera impactos negativos fuera del área del proyecto. Sin embargo, existen algunas molestias a la población difíciles de controlar, como los olores, siendo muy subjetiva su evaluación y cuantificación.

1.4 Zonas especiales

6.1.4. No debe ubicarse en zonas de: marismas, manglares, esteros, pantanos, humedales, estuarios, planicies aluviales, fluviales, recarga de acuíferos, arqueológicas; ni sobre cavernas, fracturas o fallas geológicas.

Estas zonas son especiales porque presentan un riesgo al ambiente y a la instalación en si misma. Son zonas en las que la construcción y operación de los SDF presenta

muchos puntos críticos y en general las medidas para la mitigación de impactos no son funcionales. Los riesgos a la instalación causadas por estas zonas tiene mucha relación con los fenómenos sísmicos y meteorológicos, motivo principal de esta restricción. En el glosario se presenta una definición técnica de cada una de las zonas que abarca esta restricción.

Las zonas de marismas, manglares, esteros, pantanos, humedales y estuarios presentan un riesgo elevado debido a la erosión ocasionada por las corrientes estacionales, además, del impacto negativo a estos ambientes naturales. En general no existen obras de infraestructura para SDF que resistan las condiciones meteorológicas.



Figura 3. Residuos dispuestos en un humedal.

Las zonas de planicies aluviales, fluviales en realidad presentan un nivel freático, son rocas sedimentarias no consolidadas y pueden estar sujetas a inundaciones. El motivo de esta restricción no es solo el riesgo sobre el SDF, que en algunos casos puede ser mitigado por obras de infraestructura, si no también la relación con las localidades. Las llanuras de inundación (un tipo de planicie aluvial) han sido utilizadas para los asentamientos humanos, es así por ejemplo que las grandes ciudades en México están ubicadas en estas zonas.

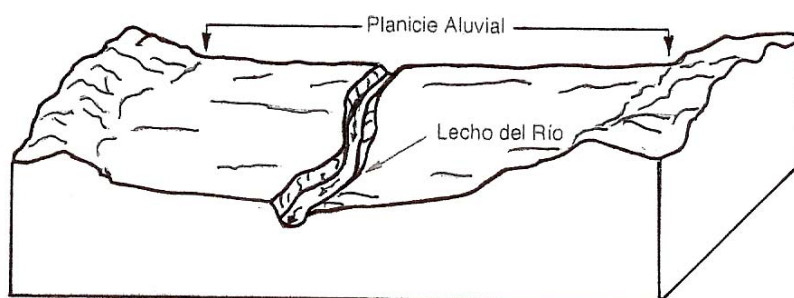


Figura 4. Superficie de inundación asociada al lecho de un río.

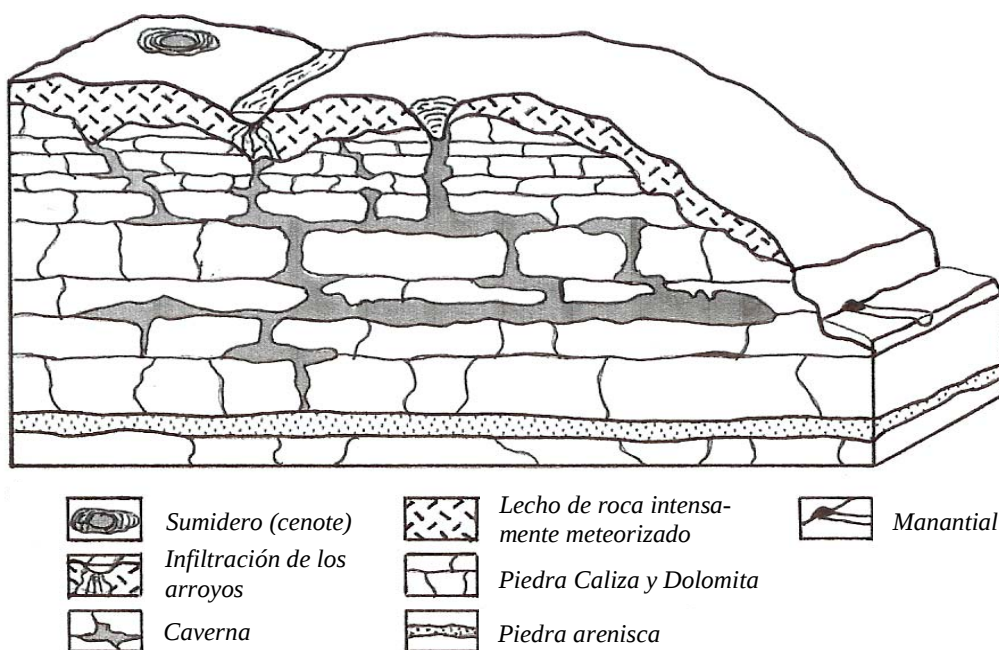


Figura 5. Potencial afectación de las aguas subterráneas en una formación cárstica.

Las zonas de recarga de acuíferos son sumamente importantes tanto para el equilibrio ecológico como para las localidades y ciudades. En muchas ocasiones los flujos subterráneos recorren decenas de kilómetros antes de aflorar a la superficie y ser utilizados. Si bien es cierto que los SDF son infraestructuras que limitan los impactos al ambiente, una posible eventualidad podría contaminar este manto freático. El cambio de uso de suelo disminuye la recarga que en las grandes ciudades tiene un déficit. En muchos casos es necesario un estudio adicional para identificar estas zonas.



Figura 6. Vista aérea de las Ruinas de Xochicalco, cercanas al SDF de Tetlama, Morelos.

Las zonas arqueológicas tienen un gran valor cultural y se encuentran protegidas por otros instrumentos legales; una fuerte fuente de ingreso en México es el turismo y un

SDF en las inmediaciones de estas áreas, disminuye el valor estético y por lo tanto afecta a esta actividad económica.

Finalmente las zonas de cavernas, fracturas y fallas presentan un riesgo en la instalación debido a los fenómenos geológicos que las caracterizan. Un evento sísmico común en muchas zonas del país puede causar afectaciones mayores a los SDF ocasionando un severo impacto al ambiente.

1.5 Zonas de inundación

6.1.5. El sitio de disposición final se debe localizar fuera de zonas de inundación con periodos de retorno de 100 años. En caso de no cumplir lo anterior, se debe demostrar que no existirá obstrucción del flujo en el área de inundación o posibilidad de deslaves o erosión que afecten la estabilidad física de las obras que integren el sitio de disposición final.

Una zona de inundación con periodos de retorno de 100 años, es cualquier área territorial, que tiene una posibilidad de inundación del uno por ciento o más, en cualquier año y por cualquier causa.



Figura 7. SDF de Residuos alojado en parte, en la zona de inundación de una corriente superficial.

Cuando se habilita un SDF en una zona con estas características, puede acarrear que las aguas de inundación impacten las celdas de confinamiento de los residuos, haciéndolos aflorar aguas abajo e impactando gravemente espacios que pueden ser muy valiosos.

La velocidad de las aguas de inundación en estas zonas, también es causa de preocupación, ya que corrientes de alta velocidad provocadas por tempestades de

corta duración, pueden causar erosión en las instalaciones, celdas, bermas, tanques y las estructuras especiales para el control del biogás y los lixiviados.

Por lo antes señalado, debe evitarse la construcción de SDF en planicies aluviales y en zonas de inundación; y cuando sea inevitable, construirlas de manera tal que resistan la inundación y que se garantice la no obstrucción del flujo, ni la posibilidad de que se presenten deslaves o agentes erosivos que pongan en riesgo la estabilidad física de las instalaciones del SDF.

1.6 Cursos de agua

6.1.6. La distancia de ubicación del sitio de disposición final, con respecto a cuerpos de agua superficiales con caudal continuo, lagos y lagunas, debe ser de 500 m (quinientos metros) como mínimo.

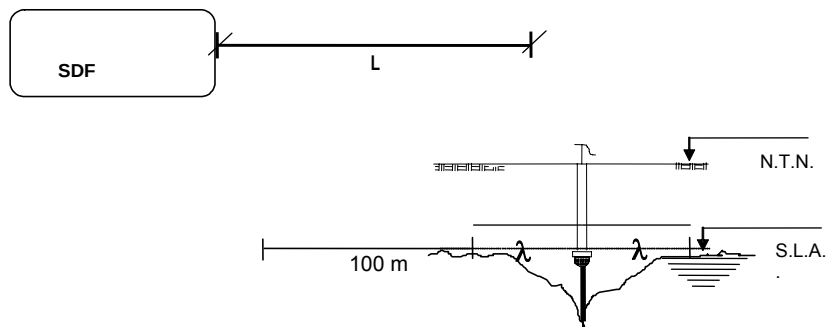
Es necesario evitar que los recursos hídricos superficiales, puedan ser contaminados, ya que los cuerpos de agua naturales o artificiales (lagos, lagunas, presas, etc.), sea cual sea la forma y distribución de sus cuencas de captación, representan áreas que se deben proteger; pues el emplazamiento inadecuado de cualquier SDF puede provocar que los lixiviados escurran hacia los cauces de ríos y arroyos, pudiendo contaminar sus aguas a lo largo de su recorrido o el embalse donde son vertidos aguas abajo.

En este punto de la norma no está determinada la restricción a los acueductos, que puede ser la restricción por derecho de vía. Los canales y acueductos se consideran como cuerpos de agua superficiales de caudal continuo y en su caso para los acueductos de sección circular revestidos con concreto, acero o algún material plástico podría disminuir la restricción.

1.7 Pozos

6.1.7. La ubicación entre el límite del sitio de disposición final y cualquier pozo de extracción de agua para uso doméstico, industrial, riego y ganadero, tanto en operación como abandonados, será de 100 metros adicionales a la proyección horizontal de la mayor circunferencia del cono de abatimiento. Cuando no se pueda determinar el cono de abatimiento, la distancia al pozo no será menor de 500 metros.

En muchas partes de la República Mexicana, el agua subterránea es la única fuente de agua potable para la población; amén de que la descontaminación de las aguas de un acuífero, implica costos prácticamente prohibitivos, cancelando la utilización de un recurso natural sumamente valioso.



N.T.N. Nivel del Terreno Natural
S.L.A. Superficie Libre del Agua

Figura 8. Distancia mínima desde el SDF a un pozo de extracción de agua.

Los manantiales también se consideran con una restricción de 500 m puesto que son fuentes de abastecimiento de agua. En muchas ocasiones la corriente que se genera es pequeña y se considera intermitente y por tal motivo no se incluye en la sección de corrientes de caudal continuo.

Cuadro 1. Resumen de puntos críticos en el cumplimiento de las restricciones de ubicación de un SDF.

Sección NOM-083	Puntos críticos
6.1.1 Aeropuertos	El área de influencia de las aves que se alimentan en el SDF no debe obstruir el cono de aproximación del aeropuerto.
6.1.2 Áreas Naturales Protegidas	Se debe de evitar la instalación de SDF en ANP; en casos especiales pueden instalarse cumpliendo con el plan de manejo, el ordenamiento ambiental y la evaluación de impacto ambiental.
6.1.3 Áreas Urbanas	En proyectos ejecutivos nuevos no se permite instalar SDF a menos de 500 del límite urbano actual. En planes de regularización deben de construirse obras de infraestructura (barrera de árboles, alambre de púas, etc.) para limitar los impactos a la población. En caso de no existir límite urbano se considera el límite donde exista una densidad poblacional de 2 viviendas por hectárea.
6.1.4 Zonas especiales	Estas zonas no se permiten la instalación de SDF debido a los riesgos a la instalación y al ambiente. En casos de planes de regularización este tiene que ser de clausura.
6.1.5 Zonas de Inundación	Las obras de infraestructura que se construyan si un SDF esta instalado en una zona de inundación deben asegurar la integridad de la infraestructura aún en un evento de gran magnitud como un huracán. En el caso de un plan de regularización, es necesario realizar los trabajos de nivelación necesarios para evitar la erosión de las celdas en un evento de gran magnitud.
6.1.6 Cuerpos de Agua	La restricción es estricta para proyectos ejecutivos y para el caso de planes de regularización debe de construirse la obra de infraestructura necesaria para evitar la erosión de las celdas en un evento de gran magnitud.
6.1.5 Pozos	Para el caso de proyectos ejecutivos es una restricción estricta. En Planes de Regularización se debe de comprobar que las operaciones del SDF no afectan la calidad del agua en el pozo

2 Estudios y análisis previos para la selección del sitio.

Los estudios de este capítulo corresponden a la sección 6.2 de la norma y solo son requeridos para los SDF de mayor tamaño, los tipos A. La información que se obtiene de estos estudios es indispensable para garantizar que la obra de infraestructura no presente un riesgo al medio ambiente, principalmente al recurso agua. Es deseable que todos los SDF cuenten con información que permita conocer la relación entre las fuentes de agua subterránea y los residuos, sin embargo, en los SDF más pequeños la NOM 083 solo solicita una evaluación geológica e hidrogeológica.

Los estudios geológicos e hidrogeológicos regionales para el caso de un proyecto ejecutivo para un SDF nuevo solo se deben de realizar hasta tener la certeza de que se cumple con las restricciones establecidas en la NOM y en el menor número de casos ser motivo para la elección del sitio. En el caso de los Planes de Regularización estos estudios proporcionan la información sobre el nivel de contaminación del agua subterránea causada por los residuos que permite la toma de decisiones. Un SDF con evidencias de contaminación tiene que ser modificado para limitar el impacto al ambiente, de acuerdo a la política ambiental (aprovechamiento, conservación, protección o restauración).

La aplicación práctica de ciencias como la Geología y la Hidrogeología, son fundamentales para evaluar la vocación natural de sitios donde establecer un SDF. Nos informan sobre la estructura del subsuelo para saber si son o no vulnerables a la contaminación de acuíferos por infiltración de líquidos percolados. También nos proporcionan la información necesaria para evitar colapsos de la infraestructura debidos a los fenómenos meteorológicos y geológicos. Para esto es importante definir dos conceptos: **vocación natural del terreno** y **vulnerabilidad a la contaminación de los recursos hídricos subterráneos**, que son dos aspectos estrechamente relacionados, puesto que ambos dependen de las características del subsuelo.

Cuando se hable de **vocación natural del terreno**, se refiere a la capacidad natural de un sitio para aceptar la disposición de residuos, sin que se provoquen daños a los recursos hídricos del subsuelo. Esto depende del conjunto de las características físicas y químicas del material que se localiza entre la superficie del terreno, donde serán depositados los residuos y la profundidad a la que se encuentra el acuífero (material que almacena y transmite agua); con base en lo anterior, un sitio tendrá vocación natural, cuando no exista posibilidad de contaminar al agua subterránea, lo cual sucederá cuando se presenten los siguientes casos:

- No existan acuíferos en el subsuelo;
- El acuífero esté protegido por una capa superior impermeable de espesor y distribución considerables; y
- El acuífero sea libre, pero la zona no saturada tenga un gran espesor y esté constituida con materiales con una elevada capacidad de intercambio iónico.

En cualquier otra situación, existirá siempre alguna posibilidad de que los recursos hídricos subterráneos sean contaminados, de ahí la importancia de establecer mediante diversos estudios para establecer el modelo de funcionamiento hidrogeológico de la zona de interés.

Ahora bien, cuando sea mencionado el concepto **vulnerabilidad a la contaminación de los recursos hídricos subterráneos**, se estará hablando del conjunto de características físicas y químicas del terreno, que al conjugarse puedan permitir que los contaminantes reactivos y no reactivos, lleguen al agua subterránea deteriorando su calidad; con este concepto se pretende precisar cualitativamente, la probabilidad de que el agua subterránea sea contaminada por líquidos percolados (lixiviados) provenientes de los residuos depositados sobre el suelo.

En conclusión, para establecer si un terreno tiene **vocación natural** para confinar o almacenar residuos, así como para evaluar la **vulnerabilidad** del agua subterránea a la contaminación; es necesario plantear con detalle, el marco geológico e hidrogeológico de referencia, lo cual significa comprender tridimensionalmente la distribución y la composición de los materiales en el subsuelo.

La mejor opción será iniciar con estudios geológicos e hidrogeológicos regionales, que involucren la extensión del territorio natural, social o políticamente elegible, a fin de identificar las áreas en donde se tengan las mejores condiciones naturales. Este tipo de estudios va de lo general a lo particular, esto es, se inician con el estudio de grandes extensiones (estudios de gran visión), para tener un conocimiento regional del modelo geohidrológico; cuyo objetivo es la identificación de regiones con vocación natural, en donde puedan llevarse a cabo posteriormente estudios de detalle (estudios específicos). Esto significa encontrar los sitios en donde la vulnerabilidad de los recursos hídricos subterráneos sea mínima; de esta forma, siempre se tendrá la seguridad de contar con la mejor opción técnica, con una inversión económica reducida, en obras de ingeniería.

En el proceso de selección, no tan solo deben intervenir criterios científicos de carácter técnico, sino también políticos, legales y sociales; de hecho, los problemas que pueden suscitarse por cuestiones político-sociales, son eventos críticos para que se dé la cristalización de un SDF. De aquí que es importante, incluir estos aspectos en los trabajos de planificación.

2.1 Estudio geológico

6.2.1 Estudio geológico. Deberá determinar el marco geológico regional con el fin de obtener su descripción estratigráfica, así como su geometría y distribución, considerando también la identificación de discontinuidades, tales como fallas y fracturas. Asimismo, se debe incluir todo tipo de información existente que ayude a un mejor conocimiento de las condiciones del sitio; esta información puede ser de cortes litológicos de pozos perforados en la zona e informes realizados por alguna institución particular u oficial.

Aspectos que debe considerar un estudio geológico.

Un estudio geológico se enfoca al conocimiento de la estructura terrestre, lo que implica conocer su forma, consistencia y evolución. Para lograrlo, es necesario recopilar la información que estudian ciencias como la petrología, geomorfología, sedimentología, estratigrafía y tectónica, entre otras. Esto se lleva a cabo por medio de una geología práctica, en la que se estudia no sólo el sitio de interés, sino el entorno del mismo. En este orden de ideas, las ramas de la Geología más empleadas en trabajos de prospección son:

Geología Física. Estudia los agentes terrestres que generan deformaciones en las rocas (pliegues), los mecanismos que generan rupturas en los materiales (fracturas y fallas); y los procesos que transforman a la Tierra; así, la Geología Física permite comprender qué tipo de procesos han cambiado el aspecto de la región que se estudia y las repercusiones que se generan en cuanto a las formas geológicas originadas.

Geología Estructural. Estudia la forma y disposición de las diversas unidades que constituyen la Tierra, involucrando a las estructuras contenidas en ellas; con esta rama de la Geología, se pueden identificar y cuantificar estructuras como: pliegues, fracturas, fallas, planos de estratificación, flujos de lava, discordancias y zonas de Karst (estructuras resultantes de la disolución del carbonato de calcio), entre otras. Todas estas estructuras dan una característica especial a los materiales que conforman un área o un sitio, e intervienen para incrementar o disminuir la permeabilidad de las rocas, para limitar a un acuífero, o para permitir que se recargue.

Estratigrafía. Estudia la sucesión eventual de las fases de depósito tanto de las rocas estratificadas (rocas sedimentarias), como de las pseudo-estratificadas (rocas volcánicas depositadas por aire, como cenizas, tobas, etc.), así como la naturaleza de las mismas y la correlación de los estratos de diferentes lugares. De esta forma, se puede establecer el arreglo de las rocas en el subsuelo, partiendo del existente en superficie, así como de las estructuras que las afectan. En muchas ocasiones, este conocimiento se logra por medio de la correlación, aplicando lo que sucede en sitios relativamente próximos, en donde las condiciones geológicas son similares.

Sedimentología. Se encarga de describir los ambientes en que se depositan los materiales, así como los efectos que posteriormente los afectan. Con base en esto, se establece el sello distintivo y las características físicas y químicas (facies sedimentarias) de las rocas así formadas. El principio en el cual se basa la Sedimentología, se denomina “uniformismo”, que a la postre dice: “El presente es la clave del pasado”, esto es, la forma en que están ocurriendo los procesos sedimentarios en la actualidad, es igual a la forma en que se dieron en el pasado. Partiendo de las características físicas y químicas de las rocas a nivel de superficie, es posible suponer el ambiente de depósito en que se acumularon los materiales de una determinada región o sitio, e inferir su proyección hacia el subsuelo. Así, se estará en posibilidad de predecir la existencia de agua subterránea, de su movilidad y de la capacidad de auto depuración del terreno por intercambio iónico.

Finalmente la **Geología Histórica**, tiene implicaciones más amplias, se apoya en las partes de la Geología comentadas anteriormente, para establecer la secuencia paso a paso, de los sucesos que constituyen la historia de la región que se está analizando, con lo cual se dispone de un modelo conceptual geológico de lo ahí ocurrido; esto es, el geólogo cuenta con la posibilidad de describir cuándo y qué tipo de eventos geológicos ocurrieron, cómo se sucedieron unos a otros, qué tipo de materiales se formaron en cada caso, qué estructuras los afectaron, cómo fueron deformados y cómo llegaron a adquirir su aspecto actual, entre otras cosas.

A partir del conocimiento de los aspectos antes descritos, se podrá formular un **Marco Geológico de Referencia**; que se desarrolla en un ámbito geográfico más amplio al entorno del sitio que interesa evaluar. El objetivo de ello, es identificar los procesos geológicos que ocurrieron en la región dentro de la cual se ubica el sitio. Así, podrá establecerse lo siguiente:

- La litología de la región, es decir, la composición de los materiales aflorantes.
- Los tipos de roca y características físicas y químicas de los materiales identificados en el sitio.

Es importante resaltar que este estudio se basa en información existente en otros estudios o información básica recolectada por percepción remota. Es un estudio que incluye una gran área entorno al SDF y el nivel de detalle debe ser el mínimo necesario para la realización del estudio hidrogeológico.

Complemento analítico mediante el empleo de métodos de sondeo indirectos

Una vez que ha sido definida la distribución espacial y composición de los materiales en la zona de estudio, se tiene el planteamiento no solo de la litología, sino también de las estructuras existentes; este conocimiento es certero en superficie, pero hipotético en el subsuelo, por esta razón es necesario llevar a cabo actividades complementarias, que nos permitan corroborar el modelo geológico conceptual supuesto para el subsuelo. La forma más exacta de hacerlo, es mediante la perforación de pozos, por medio de los cuales se obtienen muestras en superficie del material cortado; esto sin embargo tiende a ser una limitante, ya que la información es puntual y tendrían que perforarse una gran cantidad de pozos, para tener un buen conocimiento horizontal y vertical del subsuelo. La solución a este problema ha sido emplear métodos indirectos, que de forma rápida y económica permiten tener un modelo más preciso del subsuelo; estos métodos son conocidos como métodos de prospección geofísicos.

En general, la finalidad de la prospección geofísica, es la detección de texturas y estructuras a través del análisis de sus propiedades físico-químicas como son resistividad, densidad y magnetismo, entre muchas más; si bien el número de éstas puede ser muy variado, los métodos desarrollados para estudiarlas son igualmente variados y se clasifican de acuerdo al tipo de energía que utilizan, como a continuación se describe.

Magnético. Este método utiliza el magnetismo de las rocas de la corteza terrestre, que consiste de dos partes, el magnetismo inducido y el magnetismo remanente; el

primero es debido al campo magnético de la Tierra y el remanente es el que fue adquirido cuando se formaron las rocas. Es el método de exploración más antiguo y es poco usado en estudios hidrogeológicos; en el caso de estudios de índole ambiental, se utiliza cuando se sabe que el contaminante puede tener alguna propiedad magnética.

Gravimétrico. Se basa en las variaciones de gravedad causadas por un contraste de densidad entre una estructura o roca y la del medio que la envuelve; este método estudia las anomalías de la gravedad en la superficie terrestre, para deducir la estructura y forma del basamento; normalmente se utiliza en estudios regionales. Es útil también para determinar la existencia de grandes fallas, que pongan en contacto rocas de diferentes densidades. Sus alcances en la hidrogeología son limitados, por lo que se usa poco.

Electromagnético. Estudia la influencia del terreno sobre un campo electromagnético artificial. Es un método caro pero con buena resolución para explorar de forma rápida el subsuelo. Debido a que sus resultados dependen de las características físicas de los materiales y de los fluidos que contienen, son aplicados para el reconocimiento de las condiciones hidrogeológicas y para la identificación de frentes de contaminación.

Sísmico. La sismología de exploración, se basa en el análisis del comportamiento de las ondas sísmicas, las cuales son registradas a partir de sismógrafos. Las fuentes de energía que generan las ondas sísmicas están controladas y son móviles; las distancias entre la fuente y los puntos de detección son relativamente pequeñas. El objetivo de la exploración sísmica es deducir información acerca de las rocas, especialmente sobre la posición de las capas. Es una técnica muy empleada en la exploración petrolera, aunque también se usa en la ingeniería civil, sobre todo para medir la profundidad del substrato rocoso; debido a que es una técnica más costosa que la eléctrica resistiva, con una definición equiparable a ella, es poco empleada en Geohidrología y en estudios ambientales.

Eléctrico Resistivo. Todos los métodos eléctricos funcionan a partir de la emisión de una corriente eléctrica a través de dos o más electrodos puntiformes y de su recepción a través de otros dos electrodos adyacentes receptores del potencial inducido. Su arreglo es lo que marca la diferencia entre sí, utilizándose para la prospección de agua subterránea los sondeos eléctricos verticales (SEV) y los sondeos de polarización inducida; para la determinación de cavernas y para la definición de zonas contaminadas, las calicatas y los arreglos dipolares; mientras que para la prospección de irregularidades físicas, el arreglo Wenner o el Lee; y finalmente, para la prospección minera, los sondeos de polarización inducida o de bloques. Ahora bien, aunque es cierto que existe un buen número de métodos eléctrico-resistivos, los sondeos eléctricos (SEV) son los más usados para la prospección de agua, debido a que presentan una mejor definición en las anomalías verticales; es por ello que dicho método, representa el arreglo mayormente usado para el estudio de sitios propicios donde establecer SDF.

La información geofísica obtenida, tiene que depurarse en gabinete a través de paquetes computacionales, hechos ex-profeso para ello; lo cual da como resultado, gráficas con valores para que el especialista los correlacione con la geología de la región, para así poder dar una interpretación de lo que se obtiene. En un sentido amplio, la geofísica proporciona las herramientas para evaluar el modelo geológico subterráneo.

Como resultado de los estudios geofísicos y de su correlación con la exploración geológica, se establece un modelo geológico en superficie y uno geoelectrico en el subsuelo, el cual se calibra a través de los cortes litológicos obtenidos con la perforación de algunos pozos (dependiendo del tipo de material y área) en diámetro reducido (se recomienda entre 2 a 3 pulgadas). De esta forma, las secciones geoelectricas realizadas durante la fase de interpretación geofísica son fácilmente calibradas y transformadas en secciones geológicas y finalmente en hidrogeológicas, permitiendo establecer un modelo conceptual geológico más detallado, pues se integra al previamente formulado, el conocimiento del tipo y comportamiento de los materiales en el subsuelo.

Es importante resaltar, que la realización aislada de estudios geofísicos de cualquier tipo, sin un conocimiento de la geología del área y sin alguna correlación con los cortes litológicos de las perforaciones, representa un gasto inútil; ya que su interpretación, tendrá muy altas probabilidades de ser errónea. En resumen, para explorar de forma correcta el subsuelo, es imposible aplicar aisladamente las técnicas geofísicas, puesto que éstas funcionan simplemente como un auxiliar de la geología.

2.2 Estudio hidrogeológico.

6.2.2 Estudios hidrogeológicos

a) Evidencias y uso del agua subterránea

Definir la ubicación de las evidencias de agua subterránea, tales como manantiales, pozos y norias, en la zona de influencia, para conocer el gradiente hidráulico. Asimismo, se debe determinar el volumen de extracción, tendencias de la explotación y planes de desarrollo en la zona de estudio.

b) Identificación del tipo de acuífero

Identificar las unidades hidrogeológicas, tipo de acuífero (confinado o semi-confinado) y relación entre las diferentes unidades hidrogeológicas que definen el sistema acuífero.

c) Análisis del sistema de flujo

Determinar la dirección del flujo subterráneo regional.

La Hidrogeología como tal, corresponde al estudio de los factores geológicos relacionados con el agua existente en ellos. A partir de esto, se puede definirse como el estudio de las aguas subterráneas, su composición química, flujo y relación con el ambiente.

Es así que una vez establecido el modelo geológico conceptual, se continúa con el análisis hidrogeológico y por ende, con la delimitación de las “**unidades hidrogeológicas**” que se presentan en la zona. Éstas son definidas dependiendo de la permeabilidad cualitativa que se les confiere al tipo de material existente; este parámetro estará definido a su vez, por el tamaño y distribución de los detritos, la presencia de cementante, el grado de compactación, así como por la densidad y arreglo de las fracturas. Las unidades hidrogeológicas son entonces, agrupaciones de materiales con características similares de permeabilidad.

En la Hidrogeología hay conceptos muy importantes como el de **acuífero**, el cual definiremos como cualquier formación geológica por la que circulan o se almacenan aguas subterráneas, que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento. Los acuíferos pueden ser clasificados de distintas maneras, en este caso vamos a utilizar el factor de la presión hidrostática del agua encerrada en los mismos para su clasificación.

Acuíferos libres. Son aquellos en los cuales existe una superficie libre del agua encerrada en ellos y que se encuentra a presión atmosférica. La superficie hasta donde llega el agua se denomina “nivel freático”, y podrá estar en contacto con el aire o no. Es importante destacar que en este tipo de acuíferos no existe ningún material impermeable por encima de él. Al perforar estos acuíferos, total o parcialmente, se observa que el nivel freático (nivel real) coincide con el nivel piezométrico (nivel ideal que alcanzaría el agua a presión atmosférica). El espesor de la zona que se encuentra por encima del acuífero es muy variable y puede ir de unos cuantos centímetros a más de 100 m; estas dimensiones, son muy importantes en el momento de analizar la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación.

Acuíferos confinados. En este caso, el agua contenida en el acuífero está sometida a cierta presión mayor a la atmosférica, por este motivo ocupa la totalidad de los poros de la formación geológica que lo contiene, saturándolo totalmente. Debido a que se encuentran confinados por capas impermeables que impiden que ascienda e iguale la presión atmosférica, al perforar y atravesar el nivel superior de confinamiento, se observará que el nivel del agua asciende rápidamente hasta alcanzar el nivel piezométrico. Podrán darse pozos tipo surgentes si el nivel se estabiliza por encima del nivel topográfico y pozos artesianos si el nivel se estabiliza por debajo de la cota de terreno. La vulnerabilidad a la contaminación de este tipo de acuífero es mucho menor, ya que no existe una vía de acceso directa a los contaminantes.

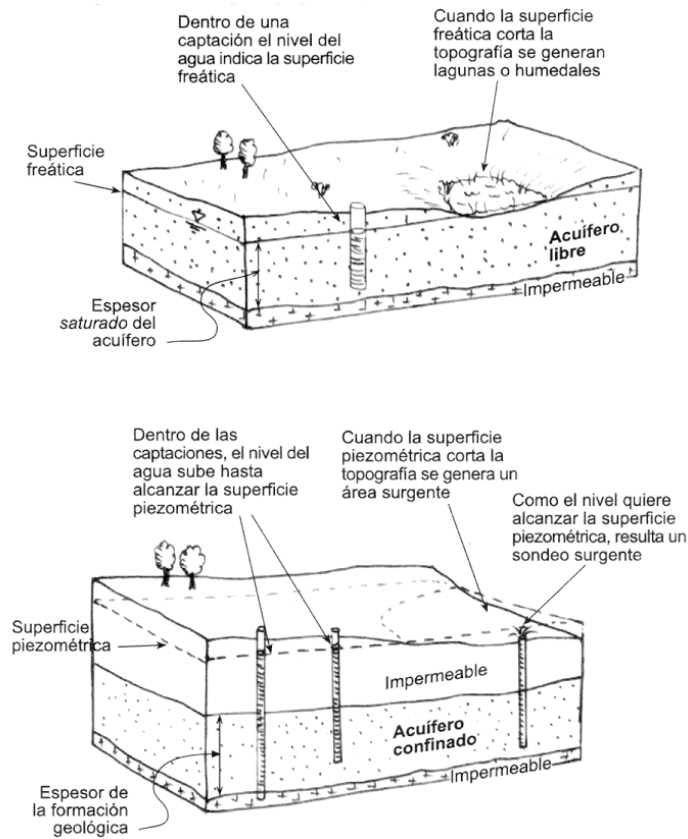


Figura 9. Ejemplo de un acuífero libre y uno confinado.

Acuíferos semi-confinados: Estos constituyen una variedad de los confinados, y se caracterizan por tener el techo (parte superior) o/y el muro (parte inferior) sellado por materiales que no son totalmente impermeables, sino que constituyen un acuitardo, es decir, un material que permite una filtración vertical que alimenta muy lentamente al acuífero principal. La contaminación de éstos puede darse, pero en un tiempo mayor que el de un acuífero libre.

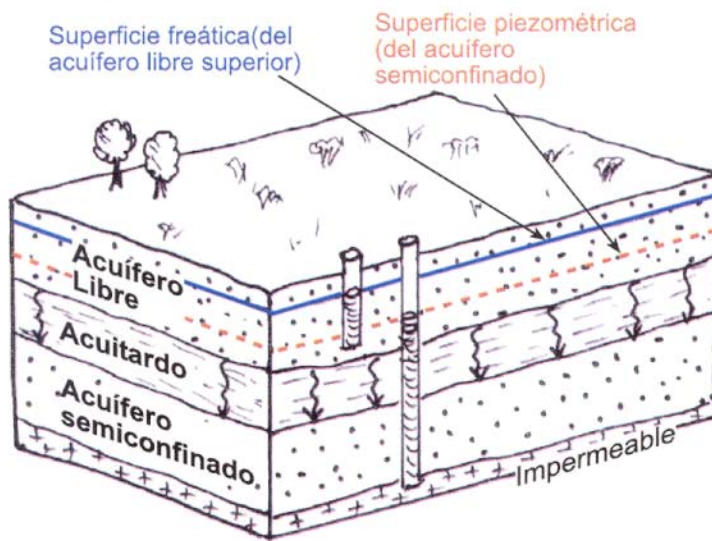


Figura 10. Ejemplo de un acuífero semi-confinado.

Acuíferos colgados: En los casos en que exista un material semi-impermeable por sobre el nivel freático, que permita la infiltración luego de que el acuífero se recargue de forma muy excepcional formando bolsones de agua, estaremos frente al caso de un acuífero colgado. Estos pueden tener unos pocos centímetros de espesor y no suponen un recurso muy fiable para la obtención de agua.

Dentro del estudio hidrogeológico se debe establecer los puntos de extracción de aguas subterráneas, ya sea para consumo humano, riego u otro tipo de uso. En el caso de existir dichos puntos de extracción de agua en la zona de estudio y encontrarse en uso, la CONAGUA (Comisión Nacional de Agua) o la autoridad local competente podrá solicitar un estudio específico que considere la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación y la prolongación de su radio de influencia.

Un modelo tridimensional del subsuelo permite mostrar el lugar que ocupa el acuífero con respecto al SDF con base en esta información observar el riesgo de contaminación, así como los puntos críticos. Un SDF puede construirse sobre cualquier tipo de acuífero, sin embargo, las obras de infraestructura no son las mismas. Mientras que en un acuífero libre es indispensable la construcción de una barrera impermeable, en uno confinado podría omitirse.

2.3 Estudios y análisis, en el sitio, previos a la construcción y operación de un SDF

Los estudios que se consideran en este capítulo y que se refieren a la sección 6.3 de la norma tienen como objetivo obtener la información básica para el diseño a detalle del SDF. Esta información permite realizar un diseño de SDF con criterios de eficiencia que minimiza costos de instalación y operación, así como reducir los impactos más allá del límite establecido. La evaluación de estos estudios puede ser más complicada ya que incluye un conjunto de aspectos técnicos aislados del proyecto en sí, la evaluación central está en la utilización correcta de este conjunto en el diseño del SDF. Son cuatro los elementos que considera esta sección: estudio topográfico, estudio geotécnico, evaluación geológica y evaluación hidrogeológica.

6.3. La realización del proyecto para la construcción y operación de un sitio de disposición final debe contar con estudios y análisis previos, de acuerdo al tipo de sitio de disposición final especificado en la Tabla 2 de la NOM-083-SEMARNAT-2003.

Tabla No. 2 Estudios y análisis previos requeridos para la construcción de SDF

Estudios y Análisis	A	B	C
<i>Geológico y Geohidrológico Regional</i>	X		
<i>Evaluación Geológica y Geohidrológica</i>	X	X	
<i>Hidrológico</i>	X	X	
<i>Topográfico</i>	X	X	X
<i>Geotécnico</i>	X	X	X
<i>Generación y composición de los RSU y RME</i>	X	X	X
<i>Generación de Biogás</i>	X	X	
<i>Generación de Lixiviado</i>	X	X	

A continuación, se describen los estudios que se deben realizar en el sitio donde se establecerá el SDF.

Estudio topográfico

a) Estudio Topográfico

Se debe realizar un estudio topográfico incluyendo planimetría y altimetría a detalle del sitio seleccionado para el sitio de disposición final.

Planimetría y altimetría

Se define como el procedimiento para determinar la posición de puntos de una superficie proyectados en un plano horizontal (planimetría) y vertical (altimetría). Esto permite definir: superficies, volúmenes y perfiles del sitio seleccionado, cursos o cuerpos de agua superficial, áreas de inundación, caminos en servicio, líneas de conducción de luz, agua, drenaje, gas, teléfono, etc.

Configuración topográfica

El estudio topográfico ayuda a desarrollar la ingeniería básica del proyecto ejecutivo del SDF. Con este se pueden definir la geometría del SDF, la ubicación y cantidad de material de cobertura, las cuencas aportantes de escorrentía superficial, entre otros datos.

Para este fin se recomienda que las curvas de nivel se tracen a cada cinco metros, en áreas planas y ligeramente onduladas; así como a cada metro, para zonas onduladas, hondonadas profundas y taludes escarpados.

Las escalas recomendadas para la presentación de los planos tanto topográficos como de diseño del SDF son: 1:500 para terrenos menores a 8 hectáreas y de 1:1.000 para los mayores a 8 hectáreas.

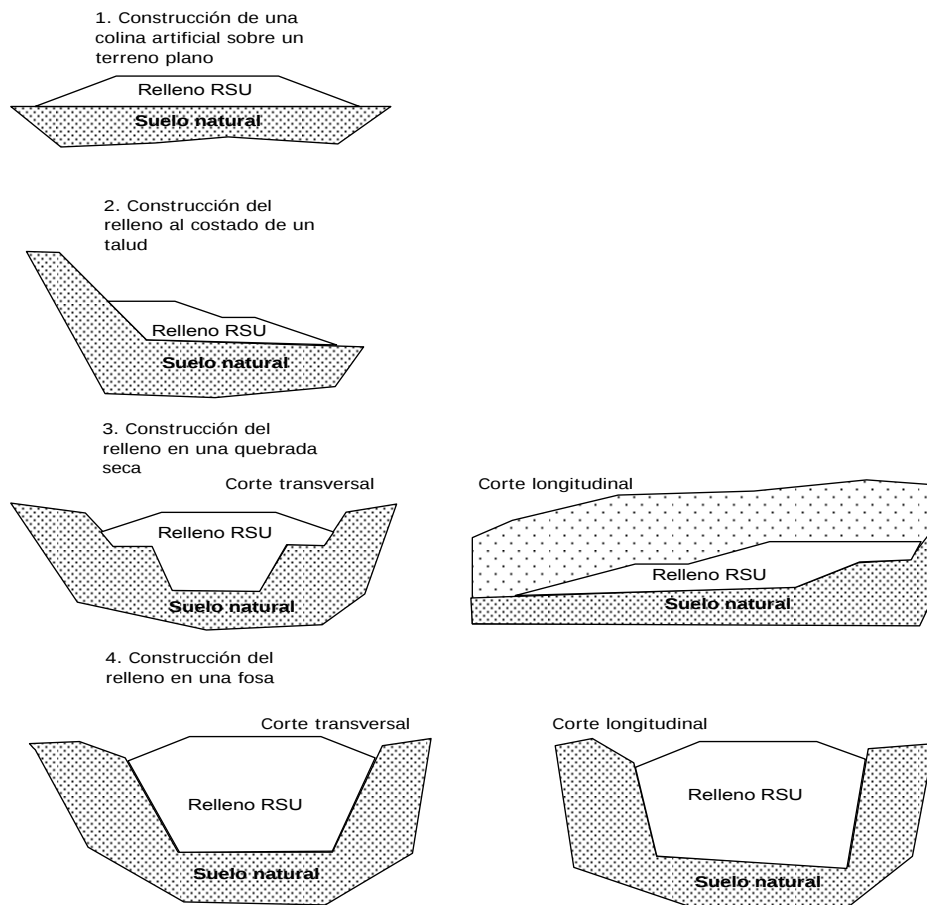


Figura 11. Formas tipo de SDF.

Estudio geotécnico

Este estudio permite conocer las características directas de los materiales en donde se asienta el SDF. Estas características permiten el cálculo de los taludes, la altura máxima, necesidades de cobertura, entre otras. Se divide en dos etapas, la primera de las cuales se realiza en campo y esta determinada principalmente por la diversidad de materiales presentes en el sitio. La segunda es en el laboratorio y se aplica todos los diversos materiales muestreados en el campo. La evaluación del estudio geotécnico se centra en que los datos sean avalados por un especialista y sean utilizados en el diseño del SDF.

Para el caso de un plan de regularización de rehabilitación o de clausura estos estudios ofrecen la información básica que permite realizar el diseño de la conformación final o de la extensión de la vida útil en una nueva celda contigua. Hay que recordar que un PR parte del hecho de que el SDF es inadecuado y por tal motivo no tiene la mejor estructura. Incluso los PR de clausura requieren de estos estudios ya que va a permitir tener la certeza de que los residuos se mantengan en el lugar donde se colocarán.

b) 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:

2.3.1.1 Exploración y muestreo

b.1 Exploración y Muestreo:

Exploración para definir sitios de muestreo.

Muestreo e identificación de muestras.

Análisis de permeabilidad de campo.

Peso volumétrico In-situ.

Exploración para definir sitio de muestreo.

Antes de la toma de muestras de suelo, se efectuará un reconocimiento en todo el sitio donde se pretende instalar el SDF, con la finalidad de elaborar el programa de exploración tomando como base su topografía, su geomorfología, su tipo de vegetación; así como los resultados del estudio geológico y geohidrológico (según el caso). Se identificarán los lugares que presenten características diferentes que pudieran afectar la realización del proyecto, como por ejemplo bancos de material permeable. Los sitios para la toma de muestra y realización de los ensayos deberá estar libre de residuos sólidos, ya que afectaría el resultado de los mismos.

Muestreo e identificación de muestras.

La toma de muestras a profundidad o superficiales, se puede llevar a efecto mediante pozos a cielo abierto o realizando perforaciones con métodos de hincado o percusión mecánica; mientras que las muestras profundas se obtienen a través de los métodos de percusión, rotación (con circulación de agua o lodo); o bien en seco, vía barrenos helicoidales.

Las muestras obtenidas, se clasificarán en el sitio, visualmente y al tacto para después protegerse contra cambios en su contenido natural de agua. Se recomienda obtener una muestra inalterada por cada 5 hectáreas de terreno, a través del empleo de pozos a cielo abierto. A las muestras obtenidas se le realizarán pruebas in situ y en laboratorio, de manera de determinar sus propiedades físicas y mecánicas.

La definición de la técnica de perforación a utilizar, para la obtención de muestras de suelo, es una decisión clave para un buen muestreo, ya que puede influir en la calidad de este. El cuadro siguiente ilustra los métodos de perforación más comunes.

Cuadro 2. Técnica de perforación recomendada para distintos tipos de suelo.

Tipo de suelo	Método		Aplicación
Suelos Blandos y Duros	Pozos a cielo abierto		Todo tipo de suelos
	Lavado con agua o lodo		Cohesivos blandos, adecuado en arenas con poca grava
	Rotación	En seco	Cohesivos blandos a duros, arriba del nivel freático
		Con agua o lodo	Todo tipo de suelos
		Mixto	Todo tipo de suelos
Suelos muy Duros y Rocas	Rotación con agua o lodo		Suelos muy duros y rocas de blandas a duras

Análisis de permeabilidad de campo.

El procedimiento mide el abatimiento de un tirante hidráulico sobre un sondeo realizado directamente en el terreno de prueba. Con los registros de los abatimientos y los tiempo de cada nivel del liquido, se proponen dos maneras de obtener la permeabilidad media del suelo (km), el primero mediante la interpretación de la grafica de abatimiento, y la segunda con la aplicación de la ecuación experimental del Cuerpo de Ingenieros de U.S. Army (CIUSA).

El método propuesto por el CIUSA consiste en medir el tiempo de abatimiento de un determinado tirante de agua, sobre un pozo previamente excavado y de dimensiones conocidas. La ecuación (1) se aplica cuando los diámetros del pozo no son uniformes, y la ecuación (2) es para cuando se tiene diámetros uniformes.

$$k_m = \frac{\pi \cdot d^2}{11 \cdot D \cdot (t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2} \quad (1)$$

$$k_m = \frac{\pi \cdot D}{11 \cdot (t_2 - t_1)} \ln \frac{H_1}{H_2} \quad (2)$$

Donde:

k_m	Coeficiente de permeabilidad medio	(cm/s)
D	Diámetro de la muestra en la cámara inferior	(cm)
d	Diámetro del tubo superior	(cm)
H_1	Carga piezométrica $t = t_1$	(cm)
H_2	Carga piezométrica $t = t_2$	(cm)
t	Tiempo	(s)

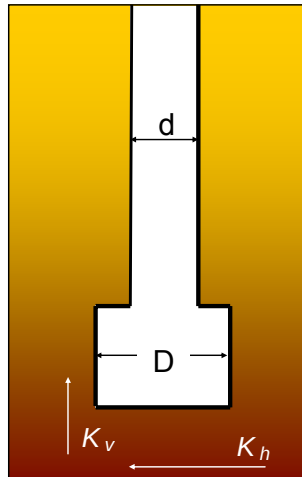


Figura 12. Pozo para la medición de la permeabilidad k_m del suelo por el método del CIUSA.

Estas ecuaciones pueden linealizarse para efectuar una secuencia de mediciones en donde se mide el tirante de agua (H) y el tiempo (t). A través de una regresión lineal obtener un valor confiable de dicho coeficiente. Es importante verificar que el coeficiente de variación no sea mayor de 33%.

Cuando el muestreo no es superficial, las pruebas de permeabilidad deben realizarse con métodos.

Peso volumétrico in situ

Se define también como Peso Específico Aparente del Suelo y significa la relación del peso del suelo en sus condiciones "en el sitio" (P), y su volumen (V).

$$g = \frac{P}{V}$$

Donde

g = Peso volumétrico in-situ del suelo, en (Kg/m^3)

P = Peso del suelo en condiciones "en el sitio", en kilogramos.

V = Volumen total del material, en m^3

Este estudio también puede efectuarse con una serie de experimentos en los que se mide el peso utilizando una balanza y el volumen con ayuda de un recipiente de volumen conocido. Una mejor medición es aquella en la se emplea el método de regresión lineal como método estadístico del análisis de los datos.

2.3.1.2 Estudios de laboratorios

b.2 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).

Consolidación unidimensional.

Análisis de resistencia al esfuerzo cortante.

Humedad.

Con las propiedades físicas y mecánicas definidas a partir de los resultados de laboratorio, se deben realizar los análisis de estabilidad de taludes de las obras de tercería correspondientes.

Para definir las propiedades físicas y mecánicas del suelo, se deben realizar una serie de análisis de laboratorio, a partir de las muestras de suelo obtenidas con los procedimientos y los dispositivos antes descritos. Las Características Físicas se determinan con los siguientes análisis: Clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), Análisis Granulométrico, Permeabilidad (mediante permeámetro de carga constante o de carga variable, según el tipo de material), Prueba Proctor (peso volumétrico seco máximo y humedad óptima), Límites de Consistencia (Límites de Atterberg) y Humedad (contenido natural de agua). Las características mecánicas tienen una mayor importancia para la realización de construcciones y se obtienen de las siguientes determinaciones: Análisis de Resistencia al Esfuerzo Cortante y Consolidación Unidimensional.

Clasificación de muestras según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (SUCS)

La clasificación de suelos (Prueba ASTM D-2487) tiene como objetivo expresar en un lenguaje ingenieril común y conciso las características generales de los suelos. El SUCS, divide a los suelos en tres grupos principales: suelos gruesos, finos y con alto contenido de materia orgánica. En la siguiente tabla, se muestran algunas de las características empleadas para la clasificación de los suelos, según el SUCS.

Cuadro 3. Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (SUCS).

Divisiones Principales			Símbolo	Descripciones Típicas
Suelo de grano grueso	Gravas y suelos granulares	Gravas limpias (poco finas)	GW	Gravas bien graduadas, mezcladas de arena y grava, pocos o ningún grano fino
			GP	Gravas poco graduada, mezclas de arena y grava, pocos o ningún grano fino.
	Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz No. 4.	Gravas con granos finos (cantidades apreciables de granos finos)	GM	Gravas limosas
			GC	Gravas Arcillosas mezclas de grava, arena y arcilla
Más del 50% del material es mayor que el tamaño de tamiz No. 200	Arena y suelos arenosos	Arena limpia (con pocos granos finos)	SW	Arenas bien graduada arenas gruesas, pocos o ningún grana fino
			SP	Arenas poco graduadas, arenas con grava, pocos granos finos
	Más del 50% de la fracción gruesa pasa por el tamiz No.4	Arenas con granos finos (cantidad apreciable de granos finos)	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo
			SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla
Suelos de grano fino	Limos y arcillas	Límite líquido menor de 50	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas polvo de roca, arenas limosas o arcillosas finas, arenas o limos arcillosos con baja plasticidad
			CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a mediana arcillas con grava arcillas arenosas, arcillas limosas arcillas finas.
	Limos y arcillas	Límite líquido mayor de 50	OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad
			MH	Limos inorgánicos suelos limosos o de arena micácea o diatomácea fina
			CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas.
			OH	Arcillas inorgánicas de plasticidad media alta. Limos orgánicos.
	Suelos muy orgánicos		PT	Turba, humus, suelos pantanosos con contenidos orgánicos elevados

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Braja M. Das. 1999

Análisis granulométrico.

Este análisis tiene como objetivo la determinación del rango de tamaño de partículas presentes en un suelo, expresado como un porcentaje del peso (o masa) seco total. Los resultados obtenidos ayudan a determinar el tipo de suelo de acuerdo a la clasificación SUCS.

Para partículas mayores a 0.075 (mm) se utiliza el análisis por cribado, el cual consiste en sacudir la muestra de suelo a través de un conjunto de mallas que tienen aberturas progresivamente mas pequeñas. El análisis hidrométrico se utiliza para tamaños de partículas menores de 0.0075 mm de diámetro.

La materia orgánica (designada con la letra O en la clasificación SUCS, es con frecuencia un componente del suelo, pero no se le asigna ningún tamaño de grano específico, ya que este varía desde partículas coloidales de dimensión molecular, hasta pedazos de materia vegetal parcialmente descompuesta, de varios centímetros de longitud.

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) clasifica los suelos en dos grandes categorías:

- Suelos de grano grueso, los que comienzan con un prefijo G (Grave) o S (Sand).
- Suelos de gran fino, los que comienzan con un prefijo M, C (Clay) u O (Organic).

Otros símbolos utilizados en esta clasificación son:

W: bien graduado

P: mal graduado

L: Baja plasticidad (límite líquido menor que 50)

H: alta plasticidad (límite líquido mayor que 50)

Permeabilidad

En la determinación del coeficiente de permeabilidad, se busca determinar la cantidad de agua por unidad de tiempo que fluye a través de una sección transversal de suelo. Este coeficiente se expresa en (cm/s). Existen varios factores de los que depende la permeabilidad de un suelo, estos son:

- Viscosidad del fluido;
- Tamaño de los poros;
- Granulometría del suelo;
- Relación de vacíos;
- Forma de las partículas del suelo; y
- Grado de saturación del suelo.

La prueba de permeabilidad se realiza confinando la muestra de suelo en un permeámetro, en donde se somete la muestra a una sobre carga igual a la presión ejercida por las capas de suelo a que se ve sometida de acuerdo a la profundidad a la cual se tomo la muestra. Posterior a esto se hace fluir agua a través de la muestra de acuerdo a una presión establecida. La siguiente figura muestra en forma esquemática la forma en que se realiza este ensayo.

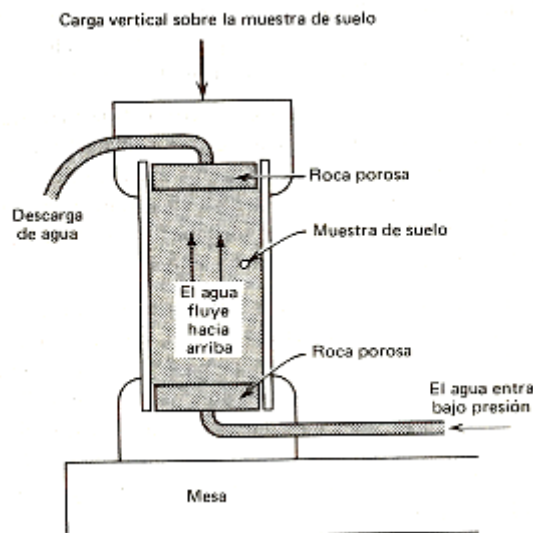


Figura 13. Esquema del ensayo de Permeabilidad¹.

Prueba Proctor

La prueba Proctor tiene como objetivo determinar la densidad máxima seca que alcanza una material (suelo) compactado con una humedad óptima. La compactación, permite aumentar la resistencia y reducir la deformabilidad, la permeabilidad y la susceptibilidad a la erosión de los suelos por el agua. Al aumentar las exigencias de compactación de las obras de ingeniería civil, se han creado equipos más pesados y con mayor capacidad de compactación. Debido a esto se desarrolló la prueba Proctor Modificado (P.M.), el cual representa de mejor forma las condiciones de compactación de campo actuales en laboratorio.

La prueba original de Proctor, utilizaba un martillo de 5.5 libras (2.42 kg), con una caída de 12 pulgadas (30.48 cm), para compactar el suelo dentro de un molde en tres capas. Actualmente se utiliza un martillo más pesado que representa una mayor energía de compactación; se emplea un martillo que pesa 10 libras (4.54 kg), cayendo y cae a lo largo de 18 pulgadas (45.72 cm), para compactar el suelo en cinco capas.

La importancia de esta prueba radica en el valor máximo de densidad que se obtiene en laboratorio, al cual en terreno se recomienda exigir sobre un 90% de dicho valor (P.M.>90%). Esta exigencia puede aplicarse tanto para obras como impermeabilización con capas de material natural (arcillas), o disposición de capas para la construcción de muros de contención de material natural.

El espesor de las capas de material natural dependerá del tipo de equipo de compactación a usar, recomendándose un espesor no mayor a 35 cm. de espesor por capa compactada.

En la verificación de la compactación, se podrán usar distintos métodos, siendo el más común la utilización del densímetro nuclear.

¹ Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Braja M. Das. 1999

Limites de consistencia

Una masa de suelo tiene tres constituyentes principales: granos sólidos, aire y agua. En los suelos que constan, principalmente, de partículas finas, la cantidad de agua presente en los poros, tiene una influencia decisiva en las propiedades de los mismos. Este ensayo busca describir la consistencia de los suelos de grano fino con contenidos de agua variable; se realiza mediante ensayos que determinan el contenido de agua requerido, en porcentaje, en el cual ocurre la transición de un estado básico a otro; sólido a semisólido, semisólido a plástico y plástico a líquido. La gama de contenidos de humedad en que un suelo permanece plástico, es una característica muy importante. Esta gama que se denomina índice plástico (IP), es la diferencia aritmética entre el límite plástico y el líquido

	ESTADO SEMISÓLIDO	ESTADO PLÁSTICO	ESTADO LÍQUIDO	
0	LP	LL		h (%)

$$\text{Índice de Plasticidad (IP)} = LL - LP$$

Los límites de Atterberg o consistencia se utilizan para definir los materiales de acuerdo al SUCS, diferenciando los materiales plásticos (arcillas), ligeramente plásticos y los no plásticos (limos).

Consolidación unidimensional

Las pruebas de consolidación, se realizan para estimar la compresión de las capas de suelos bajo las cargas. De este modo, es posible estimar el asentamiento debido a la colocación de terraplenes o cargas pesadas sobre el suelo. La prueba se realiza en un consolidómetro, en donde a una muestra de suelo se le somete a distintas cargas durante un periodo de tiempo determinado. Los resultados de este ensayo entregan un grafico logarítmico de la deformación con respecto al tiempo, en tres etapas:

- - Consolidación inicial
- - Consolidación primaria
- - Consolidación secundaria.

Estructuras civiles o terraplenes dispuestos en suelos arenosos, pueden producir los asentamientos en unos cuantos meses, después de haberse concluido la edificación. Por lo contrario, las estructuras o terraplenes dispuestos en suelos arcillosos, pueden producir asentamientos que demoren años en finalizar.

Este ensayo permite dimensionar las deformaciones que puede sufrir un suelo respecto al tiempo. La consolidación se produce por tres motivos principales:

1. Debido a una deformación de las partículas del suelo,
2. Reacomodo de las partículas del suelo,

3. Expulsión de agua o aire de los espacios vacíos.

Análisis de resistencia al esfuerzo cortante.

A la resistencia interna de una masa de suelo, por área unitaria, que ofrece a la falla y deslizamiento de cualquier plano dentro de el, se le llama resistencia al corte. Un suelo cuya resistencia al corte aumenta al incrementarse las presiones de sobrecarga, en general se considera como granular y desarrolla una fricción interna. El suelo puede tener otra característica, denominada cohesión, que es típica de los suelos limosos y arcillosos. Esos suelos tienen cierta resistencia, aun cuando no se aplica sobre ellos ninguna fuerza confinadora. Muchos suelos son una combinación de materiales granulares y cohesivos, por lo que tienen cohesión como fricción internas.

Los ensayos pueden ser realizado en equipos de corte directo, mas antigua y simple, o mediante la utilización de pruebas de corte triaxial, mas moderna y confiable para determinar los parámetros de la resistencia cortante. Esta ultima puede permite el drenaje del agua contenida en la muestra a medida que aumenta la presión de sobrecarga. Los resultados de este ensayo permiten analizar otro tipo de problemas, como estabilidad de taludes, capacidad de carga y la presión lateral sobre estructuras de retención de tierras, entre otros

Humedad

El contenido de agua de un suelo, es la humedad que puede almacenar bajo ciertas circunstancias y se expresa como porcentaje del peso del agua contenida en la muestra respecto al peso de la muestra en estado seco. En general, el contenido de agua o humedad de los suelos, varía de aproximadamente 10 a 15% para la arena, de 15 a 30% para el limo y de 30 a 50% para la arcilla. Algunos materiales, tales como los lodos, pueden tener contenidos de agua de 100 a 200%. Si se supone que una muestra de lodo tenga un contenido de humedad del 100%, indicará que una tonelada de lodo se tendrá 500 kg de agua y 500 kg de partículas de tierra. Como contraste los suelos arenosos de las zonas desérticas, suelen tener contenidos de agua del 5% o menos.

Esta prueba se realiza pesando la muestra en dos momentos y por diferencia de peso se mide la cantidad de agua. El primer momento de pesaje es la muestra inalterada, que se muele posteriormente y se pone a secar para que se evapore toda el agua, cuando esto se alcanza se pesa por segunda vez.

Estabilidad de taludes

Obtenidos los parámetros del suelo, es necesario determinar la estabilidad de la terracería sobre la cual se dispondrán los residuos sólidos. En el cálculo de la estabilidad interviene distintos variables como: la presencia de mantos freáticos, sobrecargas próximas al talud, la cohesión y ángulo de fricción del suelo a analizar.

Una vez realizado los ensayos de laboratorio obtendremos entre otros parámetros la cohesión y el ángulo de fricción de los suelos analizados. Estos parámetros permitirán definir el Factor de Seguridad (F.S.) con que se trabajara el talud. La cohesión se define como la propiedad de los suelos arcillosos para resistir los esfuerzos de corte a

los que se somete, producto de la atracción internas de las partículas del suelo. Para los suelos granulares se define el ángulo de fricción del suelo como el roce entre las partículas cuando estas se someten a esfuerzos normales. Tanto la cohesión como el ángulo de fricción del suelo, son parámetros obtenidos del ensayo de resistencia al esfuerzo de corte realizado en laboratorio. En el siguiente cuadro se muestran algunos valores típicos de ángulos de reposo para algunos materiales.

Cuadro 4. Valores típicos de ángulos de reposo para materiales selectos.

Tipo de suelo	ϕ' Grados	
	Suelto	Denso
limo	27 - 30	30 - 34
arena limosa	27 - 33	30 - 35
arena uniforme	28	34
arena bien graduada	33	45
grava arenosa	35	50

Evaluación geológica

La evaluación geológica permite determinar con detalle las características geológicas de SDF dentro de su poligonal. Esta prueba es menos extensa que el estudio Geológico y solo es requerida para los sitios tipo A y B, sin embargo, el grado de detalle permite conocer los tipos de materiales y la estratigrafía del sitio.

c) Evaluación geológica

c.1 Se deberá precisar la litología de los materiales, así como la geometría, distribución y presencia de fracturas y fallas geológicas en el sitio.

c.2 Se deberán determinar las características estratigráficas del sitio.

La idea es llegar a esta etapa, después de un estudio de planificación regional, con lo que se tendrá un conocimiento del área, por lo que la recopilación de información se centrará en obtener trabajos de detalle realizados en o cerca del área de interés, particularmente de tipo geológico y geofísico. Otro tipo de información que es conveniente recopilar, son los estudios geotécnicos y de bancos de materiales que se hayan efectuado anteriormente. Además, se busca definir la ubicación de bancos de materiales para sellar la base del SDF y de cobertura de los residuos, de lo cual se deberá establecer lo siguiente:

- Localizar y delimitar su extensión, así como evaluar los volúmenes disponibles.
- Establecer la facilidad que presentan para ser removidos.
- Evaluar la calidad del material a través de exploración directa, empleando perforaciones de pequeño diámetro (tres pulgadas), pozos a cielo abierto, trincheras, etc.

Por su carácter de estudios específicos, se buscará precisar con ellos los puntos críticos y oportunidades que ofrecen los materiales pétreos dentro del SDF que aumenten la limitación del impacto al ambiente y disminuya los costos.

Evaluación hidrogeológica

La evaluación hidrogeológica es requerida para los SDF tipo A y B, es menos extenso que el estudio hidrogeológico y tiene como objetivo determinar la relación que existe del sitio con el agua subterránea. Al igual que con el estudio hidrogeológico esta evaluación se basa en un modelo geológico y, para el caso de planes de regularización, es la base que permite establecer el grado de contaminación del recurso hídrico por causa de SDF inadecuado. En este último caso es necesario tomar la decisión de la política ambiental sea esta aprovechamiento, protección, conservación o restauración.

d) Evaluación hidrogeológica

d.1 Se deben determinar los parámetros hidráulicos, dirección del flujo subterráneo, características físicas, químicas y biológicas del agua.

d.2 Se deben determinar las unidades hidrogeológicas que componen el subsuelo, así como las características que las identifican (espesor y permeabilidad).

El objetivo de esta fase de los trabajos, es el de establecer el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del área en estudio, el cual se fundamenta en los resultados de la geología y la geofísica obtenidos a partir de los estudios de tipo regional; pero referenciándolos al sitio elegido para implementar el SDF. Al respecto, las actividades que se deben realizar durante esta etapa son:

- Verificación de las características físicas de las unidades litológicas, así como de las estructuras geológicas que las afectan, en el sitio elegido.
- Censo detallado de obras de captación de aguas subterráneas, como pozos, norias y manantiales, cercanas al sitio seleccionado.
- Identificación del tipo o tipos de acuíferos que existen y la relación hidráulica entre ellos.
- Definición de la trayectoria que sigue el agua en el subsuelo.
- Evaluación de la calidad del agua subterránea.
- Identificación de la forma en que el o los acuíferos se recargan y descargan.

Cuando así se requiera, es necesaria la perforación de hasta 2 pozos de pequeño diámetro (se recomienda entre 2 y 4 pulgadas), para establecer en forma directa las características y tipo de materiales presentes en el subsuelo del sitio elegido, así como para correlacionar esta información, con los resultados obtenidos en la geofísica, además de precisar la profundidad a la que se encuentra el nivel freático. También puede ser de utilidad, llevar a cabo determinaciones cuantitativas de la permeabilidad

de los materiales en el sitio, si es que no se pudieran extrapolar los valores de este parámetro obtenidos en el estudio regional.

Con la integración de toda la información anterior, se podrá definir el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico y de esta manera, cumplir con el objetivo originalmente planteado que es el de garantizar si el área elegida mediante los estudios previos, tiene la vocación natural para construir un SDF, sin riesgos de afectación a los recursos hídricos; o bien como ya se indicó, si es necesario desarrollar obras de ingeniería para evitar la contaminación del agua subterránea.

Es imprescindible presentar un informe, que señale lo siguiente:

- Velocidad y dirección del flujo subterráneo;
- Espesor y permeabilidad del acuífero;
- Definición de las unidades hidrogeológicas; y
- Características físicas, químicas y biológicas del agua subterránea.

3 Estudios de generación y composición

6.4 ESTUDIOS DE GENERACIÓN Y COMPOSICIÓN

3.1 Generación y composición de los RSU y RME

a) *Generación y composición de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial*

Se deben elaborar los estudios de generación y composición de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial de la población por servir, con proyección para al menos la vida útil del sitio de disposición final.

Los estudios de esta sección deben proporcionar información básica para el dimensionamiento del SDF. Los estudios no están enfocados al discernimiento exacto de la naturaleza de los residuos y por tal motivo la evaluación de esta sección debe ir orientada a aquellos parámetros básicos para el diseño. Estos parámetros son:

- Generación Total Actual de RSU y RME
- Proyección de la Generación
- Composición Física y Química Actual

Generación Total Actual de RSU y RME

Existen diversas formas de estimar este indicador algunas requieren de mayores recursos y las hay muy sencillas. Se pueden distinguir tres tipos de metodologías para realizar esta estimación a saber. La primera y más barata es aquella que considera modelos matemáticos a partir de estadísticos socio-económicos. La segunda es aquella que considera muestreos en la población y ofrece el mejor nivel de información al menor costo. La tercera son los censos que pueden tener un costo sumamente elevado si no se cuenta con un padrón de generación, sin embargo, es el método que estima con mayor confianza y precisión.

El modelo matemático más sencillo que puede emplear es el recomendado por SEDESOL. Para este modelo se requiere dos datos de la población a servir, el número de habitantes y el tipo de población. Con base en este último dato y con ayuda de la Cuadro 5 se obtiene el valor del índice de generación de residuos por habitante que se multiplica por el número de habitantes.

Cuadro 5. Índice de generación de residuos por habitante.

Tipo de localidad	Generación (Kg / Hab / Día)
Zonas metropolitanas	1.2
Ciudades medias	0.90
Localidades urbanas pequeñas	0.63
Localidades semirurales y rurales	0.38
NACIONAL	0.83
SEDESOL, 2000	

Otros modelos matemáticos relacionan la generación de residuos con otros indicadores socioeconómicos como lo son el ingreso, el número de viviendas, la ecuación, el número de trabajadores, la producción bruta, etc. Cada una de estas variables contribuye con un índice. La siguiente tabla muestra diversos factores para la ciudad de México, es importante considerar que no se pueden extrapolar directamente ya que estos fueron obtenidos en una gran metrópoli, sin embargo, se presentan con el objeto de mostrar valores de referencia.

Cuadro 6. Índice de generación de residuos de diversas actividades metropolitanas.

Tipos de Fuente Generadoras	Subclasificación	Generación Unitaria de Residuos Sólidos	
Domiciliarios	Unifamiliar, Plurifamiliar	0.616	kg/Habitante/Día
Comerciales	Establecimientos Comerciales		
	Tiendas de Autoservicio	637	kg/Establecimiento/Día
	Tiendas Departamentales	368	kg/Establecimiento/Día
	Locales Comerciales	6.65	kg/Local/Día
	Mercados		
	Carnes	4.43	kg/Local/Día
	Frutas y Legumbres	7.92	kg/Local/Día
	Abarrotes	1.025	kg/Local/Día
	Preparación de Alimentos	14.96	kg/Local/Día
	Varios	0.803	kg/Local/Día
	Mercado Sobre Ruedas-Tianguis	575.8	kg/Tianguis/Día
Servicios	Restaurantes y Bares	25.442	kg/Establecimiento/Día
	Centros de Espectáculos y Recreación		
	Centros de Espectáculos	1.23	kg/Empleado/Día
	Instalaciones Deportivas	2.62	kg/Empleado/Día
	Centros Culturales	0.33	kg/Empleado/Día
	Servicios Públicos		
	Oficinas de Servicios	3.46	kg/Establecimiento/Día
	Servicios de Reparación y Mantenimiento	1.94	kg/Establecimiento/Día
	Estaciones de Gasolina	53.12	kg/Establecimiento/Día
	Hoteles		
	5 Estrellas	1,016.90	kg/Establecimiento/Día
	4 Estrellas	218.5	kg/Establecimiento/Día
	3 Estrellas	16.81	kg/Establecimiento/Día

Tipos de Fuente Generadoras	Subclasificación	Generación Unitaria de Residuos Sólidos	
	Centros Educativos		
	Preescolar	0.04	kg/Alumno/Día
	Primaria	0.055	kg/Alumno/Día
	Capacitación Para el Trabajo	0.06	kg/Alumno/Día
	Secundaria	0.065	kg/Alumno/Día
	Técnico	0.06	kg/Alumno/Día
	Bachillerato	0.06	kg/Alumno/Día
	Superior	0.07	kg/Alumno/Día
	Oficinas Públicas	0.413	kg/Empleado/Día
Especiales	Unidades Medicas		
	1er. Nivel	1.279	kg/Consultorio/Día
	2do. Nivel	4.73	kg/Cama/Día
	3er. Nivel	5.39	kg/Cama/Día
	Laboratorios	6.34	kg/Laboratorio/Día
	Veterinarias	1.7	kg/Empleado/Día
	Terminales Terrestres	2,103.	kg/Central/Día
	Terminal Aérea	28,887.	kg/Aeropuerto/Día
	Vialidades	125.53	kg/km/Día
Otros	Centros de Readaptación Social	0.54	kg/Interno/Día
	Áreas Verdes	0.00993	kg/m2/Día
	Objetos Voluminosos	28.85	kg/Ton-Residuos Sólidos/Día
	Materiales de Construcción y Reparaciones Menores	20.85	kg/Ton-Residuos Sólidos/Día

Fuente: KOKUSAI KOGYO, 1999

Es posible también utilizar índices de generación obtenidos de otras fuentes, como son las universidades o poblaciones vecinas, sin embargo en todos los casos es indispensable considerar que tienen algún error y no se puede efectuar extrapolaciones más de las condiciones para los cuales fueron calculados.

Los métodos de muestreo tienen que ser realizados por un experto en la materia y deben de considerar diferentes estratos, así como diferentes actividades (Cuadro 6). Estos muestreos pueden proporcionar información confiable y precisa sobre todo lo referente al sistema. La evaluación tiene que hacerse en torno a los parámetros que miden el proceso más que a los índices de generación. La mayoría de los muestreos consideran distribuciones normales y en este sentido se describen los estadísticos más empleados.

Promedio: Este es el valor del estadístico que se utiliza directamente en el diseño del SDF. Cuando se realizan operaciones con estos valores hay que considerar siempre que no son solos sino que van acompañados de un intervalo de confianza.

Desviación estándar: Es la medida de la dispersión de los datos. También se puede utilizar el valor de la varianza. Con este valor se calcula el error estándar para el promedio en muestreos simples y el coeficiente de variación.

Coeficiente de variación: Este valor es el cociente de la desviación estándar entre el promedio e informa sobre el tamaño relativo de la dispersión. Un coeficiente de variación mayor al 33% normalmente es inaceptable, ya que se traduce en un error por dispersión mayor del 15% en muestreos de 30 elementos. Un mejor indicador de esta dispersión es el intervalo de confianza.

Error estándar: se refiere al indicador de la dispersión en la determinación de un parámetro se calcula con base a la varianza de las variables involucradas.

Intervalo de Confianza: Ofrece un rango que predice con cierta probabilidad que el parámetro calculado se encuentra dentro del intervalo. Entre más pequeño sea el intervalo de confianza más certeza existe de el parámetro calculado. Es común presentarlo como un porcentaje del parámetro y no debe de exceder $\pm 20\%$.

Un error muy común ocurre cuando se estima una razón. La división de dos variables aleatorias puede causar problemas de estimación y por tal motivo se debe de contar con bases sólidas en estadística. Para el caso de la estimación del índice de generación por persona es común dividir la cantidad de residuos generados en una semana por una vivienda entre el número de días y el número de habitantes. Para el caso de una sola vivienda es correcto, sin embargo para el caso de un muestreo es incorrecto ya que estima un valor sesgado a la alza. El procedimiento correcto es calcular el promedio de generación en vivienda y dividirlo entre el promedio de habitantes por vivienda.

Un buen muestreo puede generar índices de generación útiles no solo para la demarcación en donde se aplicó sino en aquellas con características similares. Las estimaciones por muestreos siempre pueden ser comparadas con las obtenidas con ayuda de modelos matemáticos en caso de duda, sin embargo, en general los muestreos siempre ofrecen mejor información.

Los censos solo son posibles cuando existe una estructura para realizarlos, estos censos son indispensables cuando hay un sistema tarifario ya que cada usuario debe estar identificado para aplicar la tarifa adecuada a su servicio. Los censos requieren de recursos humanos capacitados y número suficiente para abarcar el 100% de la demarcación.

Proyección de la Generación

Para realizar la proyección de la generación es necesario contar modelos matemáticos de estimación. El modelo más sencillo es aquel que estima la generación como función de la población de acuerdo a un modelo logarítmico:

$$RSU_t = IGRSU_0 \cdot P_0 \cdot e^{\mu t} \cdot e^{\alpha t}$$

Donde:

RSU_t = Generación de Residuos en el año t [ton/día]

$IGRSU_0$ = Índice de generación de Residuos por persona en el año 0 [ton/día/hab]

P_0 = Población en el año 0 [hab]

μ = tasa de crecimiento poblacional [año^{-1}]

α = tasa de crecimiento relativa de residuos [año^{-1}]

Este modelo tiene el inconveniente que la estimación de α se efectúa muy arbitrariamente, ya que no se dispone de mucha información para su cálculo. Normalmente se considera $\alpha=0.01 \text{ año}^{-1}$ para zonas urbanas y $\alpha=0.005 \text{ año}^{-1}$ para zonas rurales.

Otro modelo que se puede emplear es aquel que estima la generación con base al número de viviendas y unidades económicas

$$RSU_t = IGV_0 \cdot V_0 \cdot e^{\varpi t} + IGUE_0 \cdot UE_0 \cdot e^{\varepsilon t}$$

Donde:

RSU_t = Generación de residuos en el año t [ton/día]

IGV_0 = Índice de generación de residuos por vivienda en el año 0 [ton/día/viv]

V_0 = Viviendas en el año 0 [viv]

$IGUE_0$ = Índice de generación de residuos por unidad económica en el año 0 [ton/día/ue]

UE_0 = Unidades económicas en el año 0 [ue]

ϖ = Tasa de crecimiento de viviendas [año^{-1}]

ε = Tasa de crecimiento de unidades económicas [año^{-1}]

Se puede aplicar modelos más complejos para esta proyección que en general se basan en los índices de generación actuales.

Composición Física y Química actual

Esta información solo puede ser obtenida mediante muestreo, ya que la estimación a partir de estudios en general no es aplicable. Esta estimación puede efectuarse con ayuda del “método del cuarteo” que consiste en mezclar y homogenizar los residuos; posteriormente se dividen en cuatro partes se eliminan las partes opuestas. Este proceso se repite con el objeto de reducir la masa de residuos hasta obtener la cantidad suficiente para los estudios.

El método más empleado para realizar la caracterización de subproductos se presenta en la norma mexicana serie AA número 22 de año 1985. En esta norma se establece el procedimiento y listado de materiales necesarios. Si bien no es obligatoria es una base para la realización de la caracterización. Al igual que en la sección anterior lo más importante es evaluar que la dispersión sea lo menor posible comparando la desviación estándar de cada parámetro.

Cuadro 7. Normas Mexicanas relacionadas con los residuos sólidos.

Referencia	Descripción
NMX-AA-015-1985	Método de cuarteo
NMX-AA-022-1985	Selección y cuantificación de subproductos
NMX-AA-052-1985	Preparación de muestras en el laboratorio para su análisis
NMX-AA-25-1984	pH Método potenciométrico
NMX-AA-016-1984	Determinación de Humedad
NMX-AA-033-1985	Poder calorífico superior
NMX-AA-021-1985	Materia orgánica
NMX-AA-24-1984	Nitrógeno
NMX-AA-067-1985	Relación carbono / nitrógeno
NMX-AA-068-1986	Hidrogeno
NMX-AA-080-1986	Oxigeno
NMX-AA-92-1984	Azufre
NMX-AA-094-1985	Fósforo
NMX-AA-18-1984	Determinación de cenizas
NMX-AA-61-1985	Generación
NMX-AA-019-1985	Peso volumétrico "in situ"

Las normas mexicanas que se presentan en el Cuadro 7, son una referencia para la determinación de las diferentes características de los RSU, sin embargo, en la mayoría de los casos existen métodos más tecnificados para obtener las determinaciones.

3.2 Generación de biogás

b) Generación de biogás

Se debe estimar la cantidad de generación esperada del biogás, mediante análisis químicos este quilométricos, que tomen en cuenta la composición química de los residuos por manejar.

Consideraciones generales

La producción de biogás en un SDF, esta regida por los procesos de estabilización de la fracción orgánica contenida en dichos residuos. Estos procesos, aunque en su mayor parte se llevan a cabo en condiciones anaerobias (sin oxígeno) en principio. Debido al Oxígeno que queda atrapado en los intersticios de los residuos cuando se cubre con tierra también se presenta la degradación aeróbica (con oxígeno) que inhibe el proceso anaeróbico y cancela la producción de gas metano. La generación de biogás en el SDF se puede dividir en 5 fases, las cuales se describen a continuación.

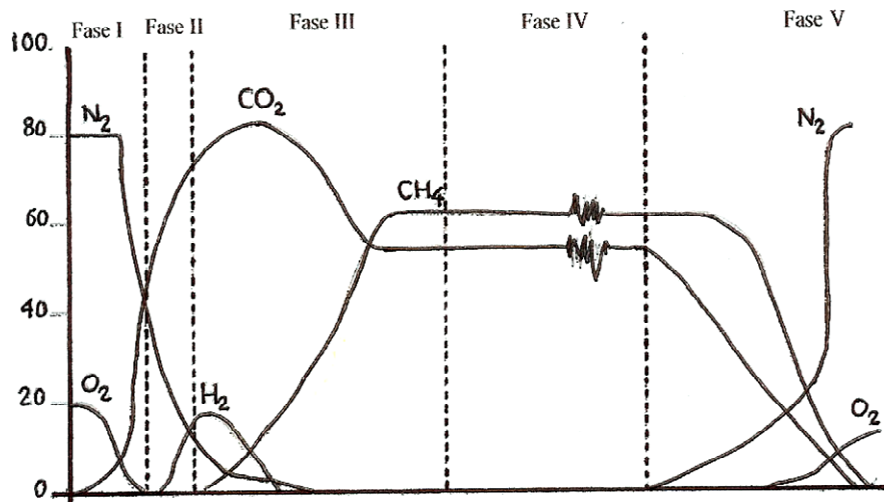


Figura 14. Fases de la generación de gases en la estabilización de los RSU en un SDF.

FASE I: Fase aeróbica que se inicia inmediatamente después que los residuos han sido cubiertos con tierra en el SDF. En esta fase, las sustancias fácilmente degradables, son estabilizadas en presencia de oxígeno y donde se produce bióxido de carbono, acompañado de una elevación de la temperatura. Esta fase por lo regular es muy corta ya que está regida por la presencia de oxígeno, concluyendo cuando este se agota.

FASE II: Esta es una fase de transición a los procesos anaerobios, ocurriendo un proceso de fermentación que aporta ácidos grasos volátiles a los lixiviados, con un descenso significativo en el pH. Este proceso, puede propiciar la liberación de metales en la matriz de los residuos. El biogás que se genera, está constituido fundamentalmente por bióxido de carbono.

FASE III: Se lleva a efecto en condiciones anaerobias. Es posible que puedan aparecer las condiciones metanogénicas, si se dan las condiciones para ello. El contenido de metano tiende a incrementarse, mientras que el bióxido de carbono decrece. Los sulfatos son reducidos a sulfitos, pudiendo haber precipitación de metales en los lixiviados. Como los ácidos grasos volátiles son transformados a biogás, el pH en los lixiviados se incrementa, su carga orgánica disminuye y el amoníaco puede incrementarse.

FASE IV: Esta fase es conocida como la "Fase Metanogénica Estable". También es una fase anaerobia donde el metano alcanza su mayor producción, con una concentración estable en la mezcla de biogás, que va de 40% al 60% en volumen. Los compuestos orgánicos acidificados presentes en los lixiviados son convertidos a biogás, por lo que su carga orgánica se reduce. Los lixiviados en esta etapa contienen fundamentalmente compuestos orgánicos biodegradables recalcitrantes (de difícil degradación). Como las condiciones son estrictamente anaerobias, el lixiviado puede contener altas concentraciones de amoníaco.

FASE V: Es la etapa final de la estabilización de los residuos, donde la producción de metano empiezan a decrecer. Las condiciones aerobias se restablecen, por la intromisión del aire atmosférico. Estas condiciones por lo regular ocurren cuando el

SDF ha sido clausurado. En SDF de mucha profundidad, esta fase concluye después de muchas décadas.

Es importante señalar que la producción total de biogás en un instante dado, equivale a la suma de la generación de cada una de las celdas individuales del SDF, considerando que se encuentran en diferentes etapas de degradación, ya que cada celda fue construida con algún desfase; siempre que el proceso se halle en la etapa metanogénica estable, que es la de mayor duración en la degradación de los residuos. Estas consideraciones llevan a concluir que, una vez alcanzada la fase metanogénica estable en las primeras celdas del SDF, esto es alrededor de un año después de iniciada su operación, la tasa de generación se hace relativamente constante, mientras se mantenga el ingreso de la misma cantidad de residuos diariamente.

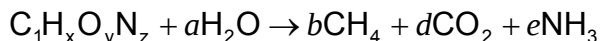
Modelos aplicables para la estimación de la producción de biogás

Los modelos que permiten la estimación de la producción de biogás son en dos sentidos, aquellos que determinan su composición y los que determinan su flujo. Dentro de los primeros la NOM indica que es necesario emplear el estequiométrico que se basa en una reacción química. Para determinar el flujo de producción de biogás en un SDF existen el “Modelo Mexicano de Biogás” desarrollado por la SEDESOL recientemente y que utiliza información generada en el balance estequiométrico. Existen otros modelos como los son el Ham y Barlaz o el presentado por Tchobanoglous y colaboradores. En cualquier caso es necesario evaluar con detalle la memoria de cálculo de la estimación.

Balance estequiométrico

Estos modelos permiten conocer la composición de biogás más que el volumen de generación. Como ya se ha mencionado la generación de biogás depende de muchas condiciones y no necesariamente se genera todo el biogás que idealmente podría obtenerse. Los modelos estequiométricos se basan siempre en una reacción química y requieren de la determinación de la composición química de los residuos. Este balance se realiza para cada uno de los elementos químicos considerados (C, H, O, N, etc.) y supone la producción de especies químicas “sencillas”. Si bien estos balances pueden hacerse muy complicados aquí se presenta el más sencillo.

El más sencillo balance estequiométrico (aplica solo para la fase IV) que se puede hacer para estimar la composición del biogás en un SDF parte de la reacción química:



Esto es, los residuos ($C_1H_xO_yN_z$) con un poco de agua y ayuda de los microorganismos producen metano (CH_4), bióxido de carbono (CO_2) y Amoníaco (NH_3). Los subíndices (x , y , z) se obtienen de la caracterización química de los residuos (solo la fracción biodegradable en este modelo) y los coeficientes (a , b , d , e) del balance de materia que una vez resuelto es:

$$a = \frac{4 - x - 2y + 3z}{4}$$

$$b = \frac{4 - x + 2y + 3z}{8}$$

$$d = \frac{4 + x - 2y - 3z}{8}$$

$$e = z$$

El Cuadro 8 muestra un resumen del cálculo utilizando la composición química típica de los residuos. La secuencia de cálculo es la siguiente:

1. Consultar los pesos moleculares de las diferentes especies químicas involucradas;
2. Consultar los porcentajes en base seca de los elementos químicos que conforman los residuos;
3. Calcular el número de moles de carbono en 100 g de residuos.
4. Calcular el número de moles de hidrógeno, oxígeno y nitrógeno en 100 g de residuos y dividir entre el número de moles de carbono para obtener los subíndices (x , y , z).
5. Calcular los coeficientes estequiométricos (a , b , d , e) con la solución de los balances por cada elemento químico.
6. Calcular el balance másico multiplicando el número de moles (coeficientes estequiométricos) por el peso molecular.
7. Calcular el volumen de los gases utilizando la densidad ($0.7167 \text{ kg/m}^3 \text{ CH}_4$ y $1.9700 \text{ kg/m}^3 \text{ CO}_2$).
8. Calcular la concentración volumétrica de los gases.

También puede emplearse un modelo más complicado que divide los residuos biodegradables en dos según si se descomponen rápida o lentamente. Este método genera dos valores de la concentración para ser usados en los modelos cinéticos con dos velocidades de reacción diferentes. Otro método considera un elemento más el Azufre y el balance de materia que propone es más complicado. El método más complicado es aquel que modela cada una de las celdas del SDF y divide los residuos de acuerdo su velocidad de degradación en varias partes y a su vez considera el azufre y el fósforo, así como las diversas fases de la descomposición. Todos estos métodos en esencia se resuelven igual solo que aumenta su complejidad y en muchos casos no aumenta la exactitud.

Cuadro 8. Resumen del balance estequiométrico para la generación de biogás.

Reactivos	% peso seco	Sub-índices (1, x, y, z)	Peso molecular g/mol	Coeficientes estequiométricos (a, b, d, e)	Balance másico (kg)	Volumen de Biogás (m ³)	Concentración volumétrica
Residuos biodegradables C ₁ H _x O _y N _z			27.7	1.00	27.7		
C	43.3%	1.00	12.0				
H	6.0%	1.66	1.0				
O	49.4%	0.86	16.0				
N	1.3%	0.03	14.0				
H ₂ O			18.0	0.18	3.2		
Productos							
CO ₂			44.0	0.52	22.7	11.5	52%
CH ₄			16.0	0.48	7.7	10.8	48%
NH ₃			17.0	0.03	0.4		
Residuos NO biodegradables y humedad restante*					69.1		
Total					100.0		100%

* Se estima que solo el 27.7% de los residuos son biodegradables, el resto son residuos NO biodegradables y agua.

Es importante resaltar que estas reacciones son ideales y no necesariamente representa la cantidad de biogás que se generaría en el SDF. En todo caso representa el máximo biogás que se puede generar por lo que es necesario completar este análisis con un modelo semiempírico para la estimación del flujo como los que se describen a continuación.

Modelos cinéticos

En el modelo de Ham-Barlaz o de cinética de orden cero, la tasa de generación de Metano es independiente de la cantidad de sustrato (c). La cinética de primer orden establece que la tasa de pérdida de materia putrescible, es proporcional a la cantidad de materia putrescible que permanece y el de segundo orden es proporcional al cuadrado de esta cantidad.

$$-\frac{dc}{dt} = k \text{ cinética de orden cero}$$

$$-\frac{dc}{dt} = ck \text{ cinética de primer orden}$$

$$-\frac{dc}{dt} = c^2k \text{ cinética de segundo orden}$$

Modelo EPA

La EPA recomienda el uso de un modelo muy simple de aplicar y que parece predecir con suficiente aproximación a la realidad, la cantidad de biogás generado en los SDF.

Fue aplicado en al menos 8 distintos SDF en el sur y centro de California y 3 en el área de Phoenix, Arizona, habiéndose comprobado los valores medidos para los años

1992 y 1993 en los sitios, debido a que existe un sistema de extracción de biogás, incluyendo un medidor de flujo en la mayor parte de ellos.

La generación total de metano del sitio toma en cuenta la masa de residuos recibida anualmente aceptando la misma tasa anual en el tiempo de operación del SDF, sin embargo si se conocen las entradas de residuos con el tiempo puede establecerse un promedio anual y con esos valores, variando anualmente, correr el modelo.

El modelo es como sigue:

$$Q = L_0 \cdot R(e^{-kc} - e^{-kt})$$

Donde:

Q = Tasa de generación de Metano con el tiempo. $\text{m}^3/\text{año}$

L_0 = Capacidad potencial del residuos de generar Metano, m^3/Mg .

R = Tasa de aceptación promedio de residuos durante la vida activa del SDF, Mg/año .

k = Tasa de generación de Metano se supone constante. $1/\text{año}$.

c = Tiempo desde la clausura del SDF, año.

t = Tiempo desde el inicio de colocación de la residuos en el SDF, año.

En la expresión, no se ha incluido ningún término de vida media o porcentaje de desechos rápida o moderadamente putrescible, pero es evidente que los valores de L_0 y k los toman en cuenta.

El modelo acepta un tiempo de retaso durante el cual las condiciones anaeróbicas se establecen, para climas semi-áridos con baja precipitación y alta evaporación; puede aceptarse por tanto, 1 año como tiempo de retraso. Para las condiciones de otros climas, no incluidos los áridos, con alta precipitación, alta temperatura y cualquier condición de evaporación; este tiempo tal vez no deba concederse. La EPA indica que en ausencia de información, se pueden usar los valores siguientes:

L_0	90 m^3/Mg	175 m^3/Mg
k	0.05 $1/\text{año}$	0.05 $1/\text{año}$

Debe hacerse notar que el biogás generado es el doble del obtenido mediante la fórmula anterior, ya que se acepta que el Metano y Bióxido de Carbono se encuentran en partes iguales.

Modelo Mexicano de Biogás

El modelo toma como base que la reacción química es de primer orden y que la velocidad es lo suficientemente pequeña para considerar todos los residuos de un año como una sola celda. El modelo matemático que se emplea para esta estimación es:

$$Q_M = \sum_{i=1}^n 2k \cdot L_0 \cdot M_i \cdot e^{-k \cdot t_i}$$

Donde:

Q_M = Generación máxima de biogás (m³/año)

k = Índice de generación de metano (indicador de la velocidad de reacción) (año⁻¹)

L_0 = Generación potencial de metano (indicador de la generación real de gas por unidad de masa de residuos) (m³/t)

M_i = Masa de residuos sólidos dispuestos en el año i (Mg)

t_i = Edad de los residuos dispuestos en el año i (años)

El modelo propuesto por SEDESOL ha sido incorporado en una hoja de Microsoft Excel © para su utilización y cuenta además con un manual explicativo. Otra característica adicional de este modelo es la que permite calcular la cantidad de biogás susceptible de aprovechamiento. Este modelo no ha sido probado completamente en la práctica y existen cuestionamientos respecto a los valores propuestos para los parámetros k y L_0 , y su dependencia de las características climatológicas.

3.3 Generación de lixiviado

Este estudio tiene como objetivo estimar la cantidad de agua percolada a través de los residuos (lixiviado) que se puede presentar en el SDF. Este lixiviado tiene características físico – químicas especiales que lo convierten en una de las fuentes de contaminación más importantes del SDF es por ello prioritaria su estimación. La estimación de la composición de un lixiviado es una tarea sumamente complicada que solo es posible conociendo con mucho detalle la naturaleza de los residuos, sin embargo, su medición es más factible. Por esto la estimación del lixiviado en el proyecto ejecutivo permite conocer los volúmenes estacionales y de esta forma dimensionar las instalaciones para su manejo y tratamiento.

c) *Generación de lixiviado*

Se debe cuantificar el lixiviado mediante algún balance hídrico.

Consideraciones generales

Se han desarrollado varios métodos de balance de aguas para estimar la cantidad de agua libre en un SDF, que puede tomarse en lixiviados. Estos métodos por lo regular, consideran un balance entre la precipitación, evapotranspiración, escorrentía superficial y caudal retenido por el suelo (capacidad de campo). La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, ha desarrollado el modelo HELP (Hidrologic Evaluation Of Landfill Performance), que permite una estimación rápida y de gran aproximación sobre la producción de lixiviados, pero que requiere información climatológica de mucho detalle, que en la mayoría de los casos no se halla disponible. El método de balance de agua formulado por C. W. Thornthwaite ha tenido una alta aceptación para el cálculo de la humedad libre que se genera en un SDF. El método se centra en la cantidad de agua que está presente en el suelo, hasta que se alcanza su capacidad de campo; así mismo, la humedad del suelo se considera como un balance entre lo que entra debido a la precipitación y lo que sale a través de la evapotranspiración.

Balance de Agua - Metodología Thornthwaite

Esta metodología, establece una relación entre la hidrología básica de superficie con el agua contenida en las celdas, a través de la cual las variaciones en la cantidad de agua en el seno de las celdas, vienen determinadas por la diferencia entre las entradas y salidas de todas las fuentes posibles con ingerencia en el balance.

Como entradas, se consideran fundamentalmente, las precipitaciones pluviales mensuales promedio. Así mismo, como salidas, se incluyen las evapotranspiraciones mensuales obtenidas a partir de las temperaturas promedio mensuales; y así como la capacidad que el suelo tiene para retener humedad antes de lixiviarla (capacidad de campo del suelo). Además, la fracción de la precipitación pluvial que se pierde por escurrimiento sobre el suelo, es también considerada como pérdida o salida.

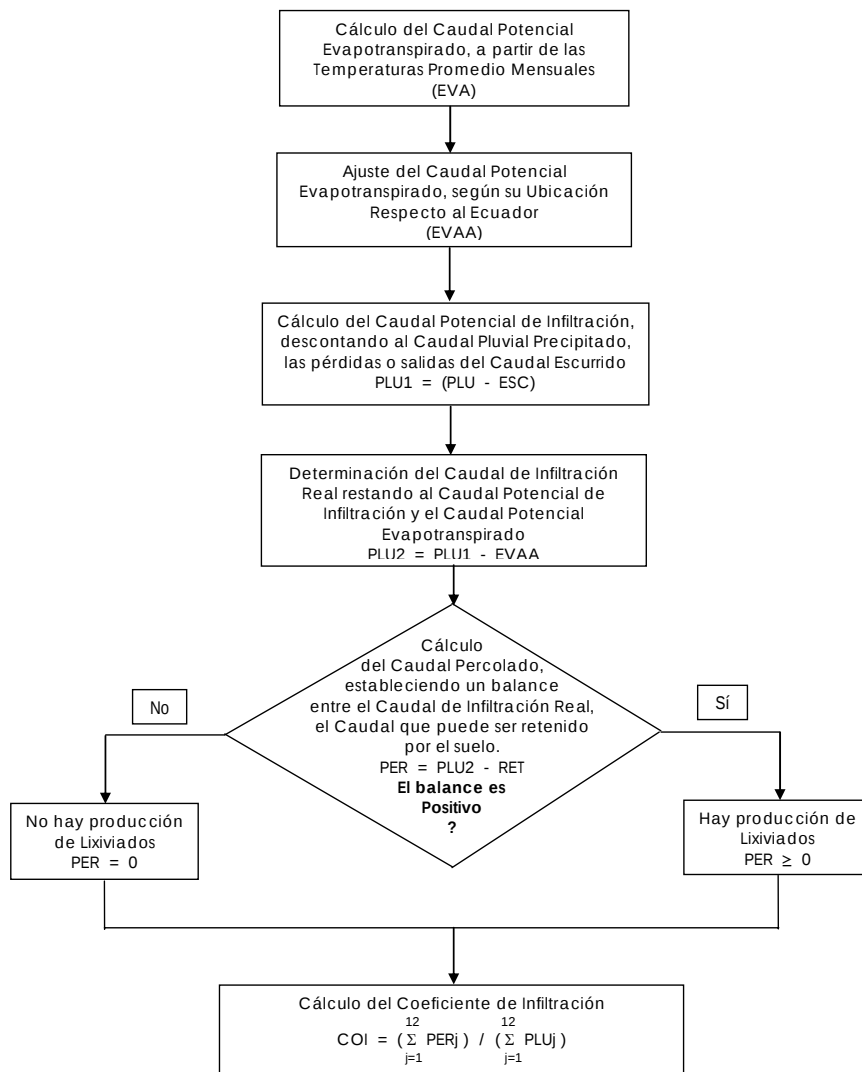
Con base en lo anterior, es posible establecer el siguiente balance de caudales.

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{Caudal} \\ \text{Percolado} \\ \text{(PER)} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{Caudal} \\ \text{Pluvial} \\ \text{(PLU)} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{c} \text{Caudal} \\ \text{Evaporado} \\ \text{(EVA)} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{Caudal que} \\ \text{Escurre} \\ \text{(ESC)} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{Caudal} \\ \text{Retenido en} \\ \text{el Suelo} \\ \text{(RET)} \end{array} \right\}$$

La aplicación de este balance, con los valores mensuales de las variables antes mencionadas, puede expresarse como metodología de cálculo según el siguiente diagrama.

Los parámetros necesarios para aplicar esta metodología son:

- - Precipitación pluvial (PLU), y se mide en milímetros (mm).
- - Capacidad de campo del suelo (RET), expresada en milímetros (mm).
- - Esguerrimiento superficial (ESC), en milímetros (mm).
- - Evapotranspiración potencial (EVA y EVAA), se mide en milímetros.



La determinación del caudal mensual evaporado, se realizará según la metodología de C. W. Thornthwaite calculando la evapotranspiración potencial media mensual, a partir

de las temperaturas medias mensuales, mediante la aplicación de las siguientes formulaciones:

$$EVA_j = 16 \cdot \left(10 \frac{T_j}{i_j} \right)^a$$

$$i_j = \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.514}$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} i_j$$

$$a = 0.49239 + 1792 \times 10^{-5} \cdot I - 771 \times 10^{-7} \cdot I^2 + 675 \times 10^{-9} \cdot I^3$$

Donde:

EVA_j = Evapotranspiración potencial sin corregir, en mm.

T_j = Temperatura media mensual, en °C

I = Sumatoria de los índices mensuales de calor, tomando meses de 30 días con 12 horas diarias de sol, adimensional.

a = Coeficiente que está en función de la sumatoria de los índices mensuales de calor, adimensional.

j = Indicador del mes considerado.

A continuación se hace una corrección tomando en cuenta la duración real del mes y el número máximo de horas de sol, según la latitud del lugar con respecto al Ecuador, mediante la aplicación de la expresión siguiente:

$$EVAA_j = Kc_j \cdot EVA_j$$

Donde:

Kc_j = Es el coeficiente que toma en cuenta la duración real del mes y el número máximo de horas de sol, según la latitud del lugar con respecto al Ecuador

$EVAA_j$ = Evapotranspiración potencial mensual ajustada, en mm.

j = Indicador del mes considerado.

El cálculo del caudal potencial de infiltración, se hará aplicando la siguiente expresión:

$$PLU1_j = PLU_j - (PLU_j \cdot Ke_j)$$

Donde:

$PLU1_j$ = Infiltración potencial mensual, en mm.

PLU_j = Precipitación mensual promedio, en mm.

Ke_j = Coeficiente de escurrimiento mensual, adimensional.

El caudal de infiltración real, se determina a partir de la ecuación siguiente:

$$PLU2_j = PLU1_j - EVVAA_j$$

Donde:

$PLU2_j$ = Infiltración mensual real, en mm.

La determinación del caudal percolado, que es la fracción de la precipitación pluvial que se expresa como lixiviado, se obtendrá aplicando el siguiente balance:

$$PER_j = PLU2_j - RET_j$$

Donde:

PER_j = Percolación real mensual, en mm.

RET = Capacidad de campo remanente, del suelo de cubierta, asignada al mes que se trate. Este valor dependerá del balance resultante del mes anterior.

Consideraciones de Importancia. El método antes descrito, se debe aplicar para cada uno de los meses del año, estableciendo el balance de agua en la capa de cubierta considerada.

El método de balance de agua, determina la cantidad agua a infiltrarse al subsuelo, por lo que es de suponerse que las condiciones del suelo deben estar bien definidas, pues son condiciones que pueden afectar la precolación, además de que existen varios coeficientes que serán utilizados en el cálculo. Por lo tanto, las condiciones, el tipo y espesor de cobertura, la presencia o ausencia de vegetación y las características topográficas, deberán definirse con precisión.

El valor de PER_j , dependerá de las siguientes situaciones:

- Cuando la precipitación mensual es igual o superior a la evaporación potencial mensual, se producirá un exceso en el aporte de agua a la cubierta de suelo; exceso que al ser absorbido, alimentará la reserva de agua almacenada por el mismo suelo.
- Si la altura de precipitación mensual es inferior a la evapotranspiración potencial mensual, sucederá que la evapotranspiración real consumirá totalmente la precipitación, generándose por tanto, un cierto déficit el cual es cubierto con las reservas de agua del suelo hasta su agotamiento. Si la reserva del suelo es suficiente para satisfacer dicho déficit, la evapotranspiración real será igual a la evapotranspiración potencial, por lo que se cae dentro de la consideración anterior; mientras que si por el contrario, la reserva de suelo resulta ser insuficiente, la evapotranspiración real queda ligada a las precipitaciones mensuales, agotadas las reservas de suelo y estableciéndose por tanto, un déficit de agua en el almacenamiento de agua en el suelo.

El cálculo del coeficiente de infiltración, se obtiene empleando la siguiente consideración:

$$COI = \frac{\sum_{j=1}^{12} PER_j}{\sum_{j=1}^{12} PLU_j}$$

Donde:

COI = Coeficiente de Infiltración, adimensional.

4 CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS Y OPERATIVAS DEL SDF

7. CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS Y OPERATIVAS DEL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL

Una vez que se cuente con los estudios y análisis señalados en la Tabla 2 el proyecto ejecutivo del sitio de disposición final deberá cumplir con lo establecido en este punto.

El cuidado en el diseño y construcción de un SDF, aunado a un manejo eficaz, el uso adecuado de la mano de obra y del equipo mecanizado, el control permanente del rendimiento y de los parámetros ambientales, son procesos y características principales que se deben considerar para el éxito del SDF. La NOM-083-SEMARNAT-2003 establece los requerimientos mínimos necesarios para el diseño, construcción y operación del SDF, siendo parte de los puntos medulares del proyecto ejecutivo.

Es importante recordar que la evaluación no sólo se debe centrar en la factibilidad técnica del proyecto, sino además en la factibilidad social y económica.

A continuación se detallan y definen cada de los puntos mínimos a considerar a partir de la normatividad vigente;

4.1 Impermeabilización

Este punto es sin lugar a dudas uno de los más importantes de un SDF, ya que, permite formar la barrera de protección hacia el medio ambiente. La impermeabilización es más rigurosa en la base, ya que, la presión hidrostática (presión por unidad de superficie ejercida por una altura de líquido a una superficie perpendicular a este) y la fuerza con la que los contaminantes pueden ingresar al ambiente es mayor en ese punto. Durante la evaluación de proyectos ejecutivos y planes de regularización o en un proceso de PEC es indispensable tener la certeza técnica en el proyecto y en terreno (en caso de ya estar construido) de que se cumple esta restricción para seguir operando el SDF. También hay que considerar que la barrera impermeable no se rompa por el peso de los residuos o se fracture por los esfuerzos causados por las celdas en un diseño inadecuado.

Es importante recalcar que la NOM-083-SEMARNAT-2003 no obliga a los municipios o empresas a utilizar una tecnología específica para la impermeabilización (geomembranas o aditivos). Su utilización deberá ser evaluada dependiendo de las características del terreno y de la disponibilidad económica del proyecto siempre teniendo como base la normatividad vigente.

La normatividad establece 2 tipos de parámetros de impermeabilidad de los terrenos donde se emplaza el SDF según el tipo de SDF a construir; estos tipos se analizan a continuación:

7.1 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.

La finalidad de esta disposición es la protección de los mantos acuíferos de su contaminación por lixiviado. La protección se puede efectuar por dos métodos o una combinación de estas: el natural y, el artificial, en función del tipo del material geológico donde se emplaza el SDF.

La protección o impermeabilización natural, aprovecha las condiciones propias del suelo. Los suelos en donde se emplaza el SDF cumplen por sí mismos con las condicionantes de conductividad hidráulica de la normatividad, por lo cual solo se debe asegurar en el proyecto y en su construcción las obras de desmonte, nivelación, compactación y obras de drenaje pertinente.

La protección o impermeabilización artificial se divide a la vez en dos tipos:

- Artificial con material natural (Adición de suelos externos con características impermeables (arcillas o tepetate)
- Artificial con materiales externos (Ej.: Polietileno de alta densidad (HDPE) se sugiere espesor 1.5 mm, geomembrana con bentonita -doble impermeabilización-, aditivos minerales, aditivos químicos, asfaltado, etc.)

Protección natural de la base del SDF

Una solución y la más económica es contar con una capa impermeable natural, así como construir el SDF sobre un terreno arcilloso ($k \geq 1 \times 10^{-7}$ cm/s). Este análisis puede realizarse en el sitio o en laboratorio, en ambos casos se debe realizar el suficiente número de mediciones y en todos los materiales diferentes para asegurar que el coeficiente cumple con la restricción. El número de mediciones dependerá de la homogeneidad del terreno, ósea, si se observa una continuidad de los materiales en toda el área del proyecto el número será menor que si existen diversos materiales, recomendándose tomar una muestra por hectáreas para comenzar la evaluación. En la evaluación del cumplimiento se debe considerar que el coeficiente de variación sea menor del 90% y en lo posible utilizar una técnica de análisis de los datos como la regresión lineal para establecer el valor de k y de su intervalo al 95%. También es de suma importancia asegurar que el laboratorio que lleva a cabo la medición cuenta con el personal capacitado y la tecnología requerida para ello, ya sea a través de una certificación o algún otro instrumento aplicable.

Conociendo el tipo de suelo predominante en el SDF, indicado por lo general en la cartografía del INEGI (cartas geológicas y edafológicas) es posible conocer, en una primera etapa, la permeabilidad del terreno y ver si de forma natural cumple con el parámetro pedido en la norma, o bien será necesario el uso de una barrera artificial (como la geomembrana o uso de aditivos minerales o químicos), esta información

puede ser suficiente para SDF tipo D, sin embargo, insuficiente para SDF de mayor envergadura, para los cuales deben realizarse las pruebas correspondientes.

Cuadro 9. Principales tipos de textura de material y sus coeficientes de conductividad hidráulica.

K (cm/s)	10 ⁻²	10 ⁻¹	10 ⁰	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
Tipos de materiales	Grava limpia		Arenas limpias, mezclas de grava y arena limpia			Arenas muy finas, limos orgánicos, mezcla de arenas, limo y arcilla, depósitos de arcilla estratificada					Suelos impermeables, arcillas homogéneas	
Propiedad de drenaje	Buen drenaje							Mal drenaje		Prácticamente impermeable		
Porosidad	Elevada							Variable		Muy baja (casi nula)		
Tipo de barrera impermeabilizante recomendada	Geomembrana o impermeabilización artificial							Impermeabilización con el propio suelo natural (desmonte, nivelación, compactación, aditivos, etc.)				

Los parámetros más importantes para definir una buena calidad en cuanto a permeabilidad del suelo (impermeabilidad) se entregan en la siguiente cuadro.

Cuadro 10. Parámetros recomendados para materiales impermeables.

Criterio	Valor recomendado
Espesor (m)	1
Coefficiente de Permeabilidad ($k = \text{cm/seg}$)	$> 10^{-7}$
Resistencia contra la erosión subterránea	Necesario
Contenido de partículas pequeñas ($< 0.002 \text{ mm}$) (%)	> 20
Contenido de arcilla (%)	> 10
Tamaño máximo de partículas (mm)	20
Contenido de carbonato de potasio (%)	< 15
Contenido de agua (%)	< 5
Contenido de materia orgánica (%)	< 5

Fuente: Diseño, construcción, operación y cierre de SDF Municipales, Eva Gröven, 2002.

El material que cumple con las características antes descritas es altamente arcilloso, lo que asegura una alta impermeabilización de la base del SDF. Independientemente de la impermeabilidad asegurada con este tipo de suelos, en el proyecto y en la construcción del SDF se debe considerar, tal como se menciono anteriormente, las obras de desmonte, nivelación, compactación simple y obras de drenaje u otras obras complementarias pertinentes.

Protección artificial de la base del SDF.

La protección natural no es fácil encontrar, sin embargo, si no se cuenta con la impermeabilidad suficiente del suelo es necesario contemplar acciones adicionales para lograrla.

4.1.1.1 Protección artificial con material natural.

Esta solución implica el traer material desde algún banco que cumpla con las características de permeabilidad los cual podría involucrar un alto costo.

El diseño con este tipo de protección debe considerar la utilización de materiales naturales inertes (arcilla-tepetate), el cual será compactado para formar una base, en capas de 0.2 m de espesor al 90% Proctor, hasta alcanzar un espesor final de 1 m.

4.1.1.2 Protección artificial con materiales externos.

Si el terreno está constituido por material poroso, está fracturado, le afectan fenómenos sísmicos o en la región se extrae agua subterránea, es necesario incrementar las acciones de protección contra posible contaminación por lixiviados. Cuando el acarreo de materiales inertes resulta demasiado costoso y se tiene la facilidad de utilizar materiales externos como geomembrana, aditivos minerales o químicos, etc., puede preferirse su uso, ya que, garantiza el cumplimiento de los requerimientos de la normatividad.

En caso de poder disponer una capa sintética sobre la base del SDF para asegurar la estanqueidad de este, se recomienda utilizar el HDPE (Polietileno de alta densidad), con un espesor no menor a 1.5 mm o un material equivalente. Las características físicas y químicas más relevantes que deben cumplir las láminas de este material son:

- No debe contener huecos, roturas, burbujas o cavidades;
- No debe tener torsiones diagonales;
- Su espesor debe ser homogéneo;
- Debe asegurar la impermeabilidad para agua, hidrocarburos clorurados y no clorurados, acetonas, y tricloroetileno;
- Debe ser resistente contra calor y condiciones climáticas adversas;
- Debe ser resistente contra roedores. Eso se prueba por exposición a ratas; y
- Debe ser resistente contra desgaste mecánico (roturas, pinchazos, etc.).

Estas características deben evaluarse antes de la adquisición del material impermeabilizante. El proveedor debe garantizar con pruebas de laboratorio que la tecnología es confiable y aplicable al tipo de material base, así como especificar la resistencia para que, en su caso, se tomen las medidas necesarias en el diseño y operación del SDF. Durante el proceso de instalación también es necesario realizar una evaluación de este, ya que, todas las protecciones pueden ser inútiles si existen errores en esta fase.

Las láminas HDPE son las más empleadas y su instalación requiere de algunos cuidados especiales como:

- Transporte de los rollos de lámina al lugar de instalación (SDF). Se recomienda el transporte de los rollos embalados y que conserven el recubrimiento que los protege de los rayos UV hasta su instalación.

- Durante la colocación de las láminas se recomienda hacerlo sobre una superficie lisa y en un orden que impida que se unan tres láminas en un punto. Se debe considerar en la instalación la dilatación y contracción de la lámina por cambios de temperatura, además de protegerlas contra el viento (se pueden utilizar sacos con arena para la fijación momentánea). Por ningún motivo se debe transitar sobre la lámina con equipo o maquinaria con oruga o cadena, ya que podría dañar la lámina.

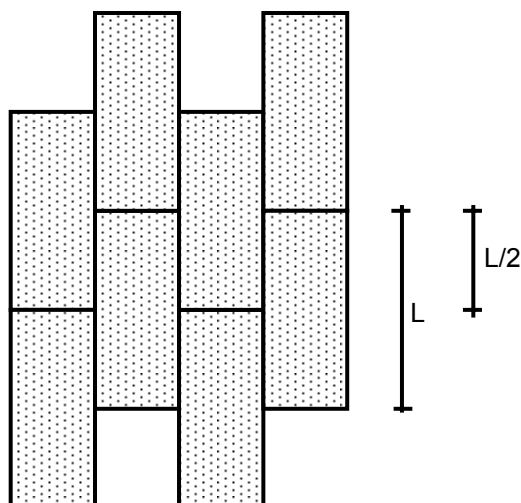
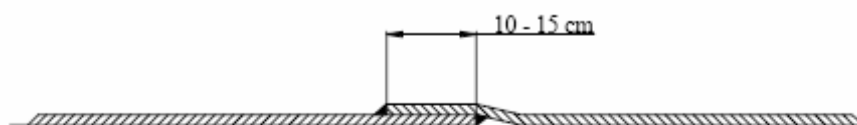


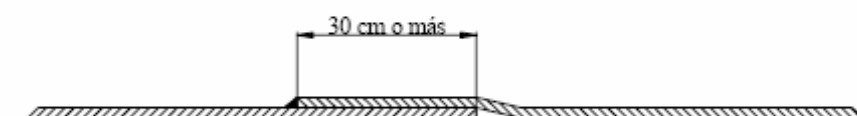
Figura 15. Recomendación para la instalación de las láminas de HDPE sobre la base.

- Las soldaduras deben ser realizadas por personal técnico especializado y con experiencia. Se debe contar además con el equipo adecuado tanto para realizar las soldaduras, como para verificar su sellado.

a) Conexión de laminillas con dos soldaduras



b) Conexión de laminillas con una soldadura



c) Conexión deficiente y poco durable

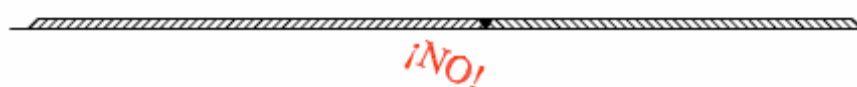


Figura 16. Soldadura recomendada para unión de laminas HDPE.

Fuente: Diseño, construcción, operación y cierre de SDF Municipales, Eva Gröven, 2002.

- No se debe colocar nada directamente sobre la lámina que pudiera dañarla (tierra, piedra, residuos, etc.). Una vez que se certifique y acepte la instalación de la lámina y las soldaduras, se podrá instalar sobre esta lámina una capa de geotextil antipunzonamiento, el cual protegerá a esta de piedras y objetos punzantes; otra opción es la adhesión de material fino (arena o material de cobertura) con un espesor mínimo de 40 cm. Como recomendación se pueden instalar neumáticos en desuso y en buenas condiciones (que no tengan alambres de acero descubiertos que pudieran dañar la lámina) sobre el sistema de impermeabilización antes de disponer los residuos. De esta manera se genera una cubierta de amortiguación y se da solución, en parte, al problema de la disposición de neumáticos usados.

Otro método de impermeabilización artificial son los aditivos que mejoran las características de los suelos existentes. La mezcla de diferentes tipos de suelo con sales minerales (materiales como anhidrita, hidróxido de calcio, silicato de aluminio hidratado) permite modificar las propiedades físico-químicas del suelo mediante reacciones de intercambio catiónico y floculación – aglomeración, aumentándose la resistencia del suelo y la estabilidad a la humedad. Este método es posible aplicarlo a suelos con índice de plasticidad mayor 10% y contenido de partículas que pasen la malla 200 exceda el 25%.

4.2 Manejo de biogás

7.2 Se debe garantizar la extracción, captación, conducción y control del biogás generado en el sitio de disposición final. Una vez que los volúmenes y la edad de los residuos propicien la generación de biogás y de no disponerse de sistemas para su aprovechamiento conveniente, se procederá a su quema ya sea a través de pozos individuales o mediante el establecimiento de una red con quemadores centrales.

Control del biogás en el SDF

Los gases generados en el SDF producto de la descomposición de la materia orgánica, puede evacuarse mediante drenajes **pasivos** o **activos**. El drenaje activo consiste en la succión del biogás mediante la utilización de equipos mecánicos. A diferencia del drenaje activo, el drenaje pasivo controla la difusión de los gases mediante la utilización de chimeneas instaladas a una distancia que varía entre los 15 a 30 m o 2 – 4 chimeneas equidistantes por hectárea. Los costos de este último sistema son mucho más bajos que el primero, sin embargo la eficiencia de drenaje es menor ya que cuando los SDF tienen más de 15 m de profundidad, el biogás no tiene la presión interior suficiente para vencer la presión atmosférica y desplazar el aire dentro de la estructura, para emerger por la parte superior de ésta, registrándose importantes migraciones laterales que dificultan la viabilidad de su aprovechamiento, además de promover situaciones de riesgo en las colindancias del SDF. El siguiente cuadro presenta los porcentajes de eficiencia que se pueden alcanzar dependiendo de la tecnología utilizada en el SDF.

Cuadro 11. Porcentaje de captación de biogás.

Porcentaje de captación de biogás	Tipo de SDF
0	SDF sin ningún sistema de drenaje de biogás
10-20	SDF con drenaje puntual pasivo (chimeneas u orificios), mal compactados y sin cobertura suficiente
25 - 50	SDF con drenaje activo (mecánico), mal compactado y sin cobertura suficiente
30 - 60	SDF con drenaje pasivo, bien compactado y con cobertura diaria suficiente
40 - 70	SDF con drenaje activo, bien compactado y con cobertura diaria suficiente
70 - 100	SDF cerrado con taludes y capa final impermeable y bien compactado, drenaje pasivo o activo

Fuente: Diseño, construcción, operación y cierre de SDF Municipales, Eva Gröven, 2002.

Sistemas de drenaje pasivos

Los drenajes pasivos no requieren de energía externa para su funcionamiento y están basados en las propiedades fisicoquímicas del biogás, así como en el diseño geométrico de la celda. Este drenaje es menos costoso que el activo pero depende de muchas consideraciones durante la construcción de la celda y del SDF en sí. El drenaje pasivo del biogás puede dividirse en dos, sin chimenea y con chimenea.

Drenajes pasivos sin chimenea

El drenaje pasivo se basa en la evacuación de los gases generados en la masa de residuos mediante perforaciones realizadas en la cobertura cubiertas con compost, el cual hace las veces de filtro biológico realizando, un primer tratamiento a los gases antes de entrar en contacto con la atmósfera.

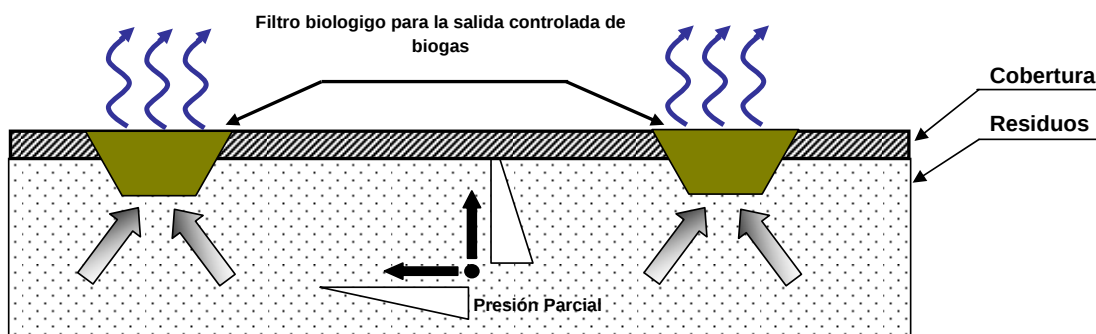


Figura 17. Modelo de filtro biológico para la evacuación de biogás del SDF.

Es posible, en el caso que se cuente con una planta de compost y las celdas sean relativamente pequeñas, cubrir las celdas con una capa de 50 cm de espesor de compost. Esta capa servirá como filtro biológico. Como la superficie de este filtro es mayor, la carga de contaminantes por área es sumamente baja, asegurando una eficiencia óptima. Esta alternativa solo se puede plantear para SDFs manuales o semi manuales del tipo D con planta de compostaje o residuos estabilizados disponible.

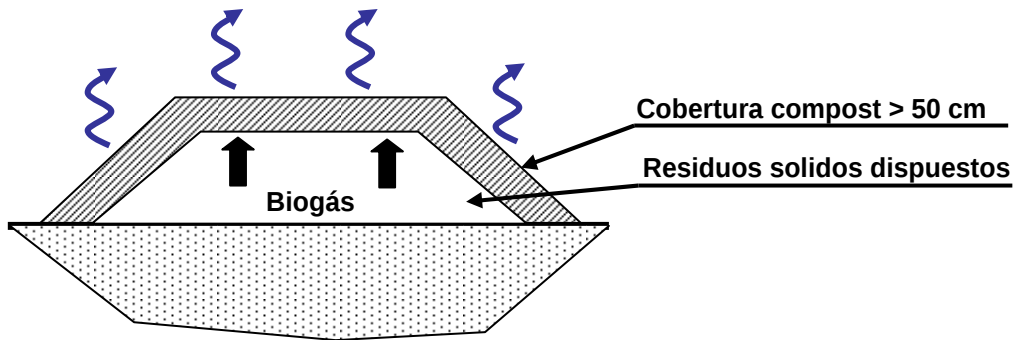


Figura 18. Cobertura de compost utilizada como filtro biológico.

Sin embargo el sistema pasivo sin chimenea tiene las siguientes desventajas:

- Impide un suministro de aire suficiente para permitir el crecimiento de las raíces de la cobertura vegetal, debido a las altas concentraciones de metano bajo la capa de tierra.
- En el caso que se generen fisuras en la cobertura o taludes, los gases se difunden por las fisuras sin pasar por el filtro biológico.
- En condiciones de mucha humedad, disposición de lodos o zonas lluviosas, el filtro biológico pierde su eficiencia.
- Si los residuos generan una gran cantidad de biogás o el biogás se difunde solo en algunos puntos definidos, se produce una carga muy alta para el filtro biológico y éste pierde su eficiencia.
- En la estación fría de la sierra, no ingresa suficiente oxígeno a los microorganismos en la capa de tierra y el filtro biológico no trabaja correctamente.
- Generalmente no se recomienda el uso del sistema pasivo sin chimenea, a excepción de los siguientes casos:
- Municipios pequeños que no cuentan con personal suficiente para la construcción de chimeneas durante la operación del SDF.
- SDF cerrados que no cuenten con ningún sistema de evacuación de biogás.
- SDF manual mal compactado. En este caso el biogás migra verticalmente en la masa de residuos debido a la deficiente compactación.

Drenajes pasivos con chimenea

Si se utiliza el drenaje pasivo con chimenea, se recomienda construir las chimeneas desde el comienzo de la operación del SDF. Este sistema aprovecha la capacidad de migración horizontal que tiene el biogás para viajar a través de los residuos y por diferencia de presión ser evacuado por la chimenea fuera de la masa de residuos. Las chimeneas deben ser construidas de tal manera que permitan una muy alta permeabilidad para la migración del biogás, dando como resultado una baja cantidad

de gas concentrado en el cuerpo de residuos que no es evacuado. Las chimeneas de drenaje pueden construirse de dos maneras:

1. Construyendo jaulas de malla con 4 puntales de madera, las que son llenadas con piedra bola a medida que avanza el SDF,
2. Utilizando tambores perforados de 200 l, llenados con piedra bola.

Cuadro 12. Requerimientos para la construcción de chimeneas.

Parámetro	Chimenea construida de malla con puntales de madera	Chimenea con tambores perforados
Ancho de la chimenea	0.5 - 1 m	ø 0.6 - 1.2 m
Material de construcción	Puntales de madera; preferiblemente eucalipto que se pueden cultivar alrededor del SDF Malla de acero; distancia entre alambre < 5 cm	Tambor de 200 lts perforado; la superficie total de orificios debe ser mayor al 10 % de la superficie del tambor. Diámetro de los orificios > 5 cm
Material para llenar la chimenea	Piedra bola o grava. Es importante que no contenga cal o material soluble que pueda descomponerse en la atmósfera agresiva del biogás y lixiviado generado en el SDF	
Dimensiones de las piedras	Se utiliza preferiblemente piedra bola con un diámetro < 16 cm, lo que impide una rápida congestión por causa del arrastre de finos de los lixiviados.	
Distancia entre las chimeneas	25 - 30 m en SDF manuales o semi manuales que tienen celdas con una altura de menos de 8 m	
	20 - 25 m en SDF compactados donde el cuerpo de los residuos tiene una altura < 15 m	
	15 - 20 m en SDF compactados donde el cuerpo de los residuos tiene una altura > 15 m	

Fuente: Diseño, construcción, operación y cierre de SDF Municipales, Eva Gröven, 2002.

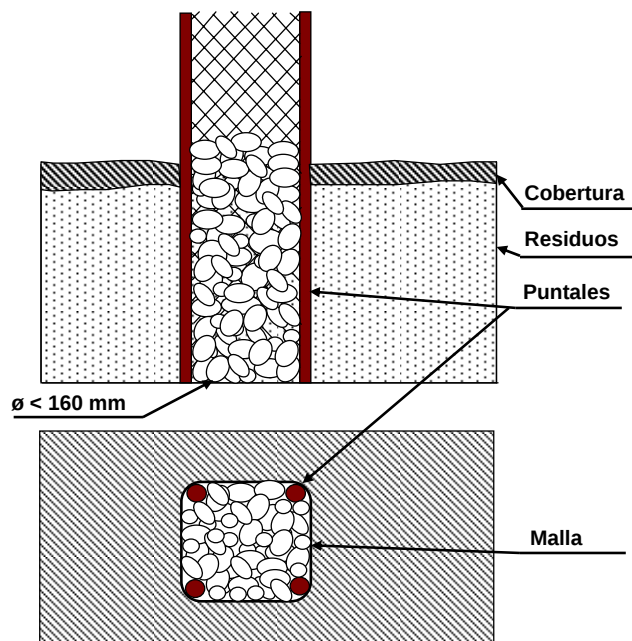


Figura 19 Chimenea con malla y puntales para drenaje pasivo de biogás.

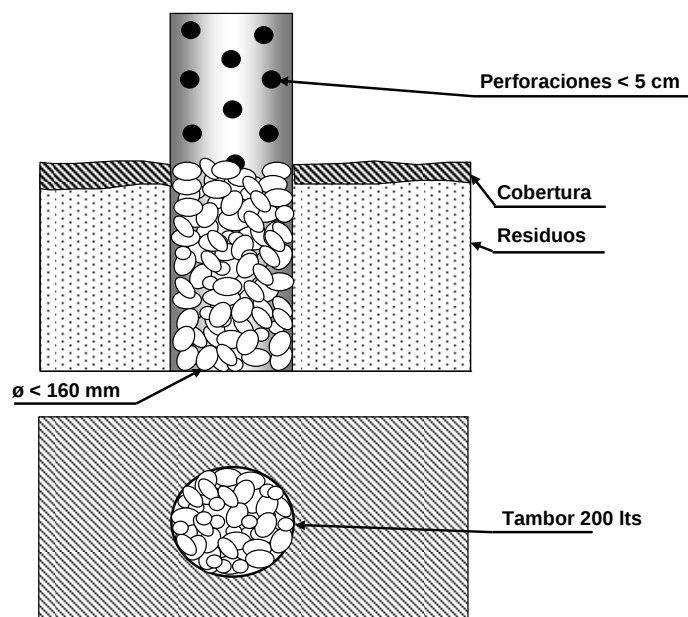


Figura 20. Chimenea con tambor para drenaje pasivo de biogás.

Incineración del biogás en chimeneas

Todo el biogás que es evacuado, ya sea de manera activa o pasiva mediante la utilización de chimeneas en los SDF tipos A, B o C, debe ser quemado. Lo anterior con el fin de minimizar sus efectos negativos a la atmósfera, minimizar el peligro de explosiones o incendios en el SDF, y disminuir los contaminantes que afectan negativamente al lugar.

Para incinerar el biogás en las chimeneas es necesaria la instalación de un tubo de hormigón vibrado o tubo metálico, sin dañar la estructura de la chimenea. El tubo debe insertarse dentro de la chimenea al menos a 80 cm. Con el fin de evitar la migración

de biogás por el contorno de la chimenea, se debe instalar un poncho o sello plástico y ser cubierto con material de cobertura, como lo muestra en la siguiente figura.

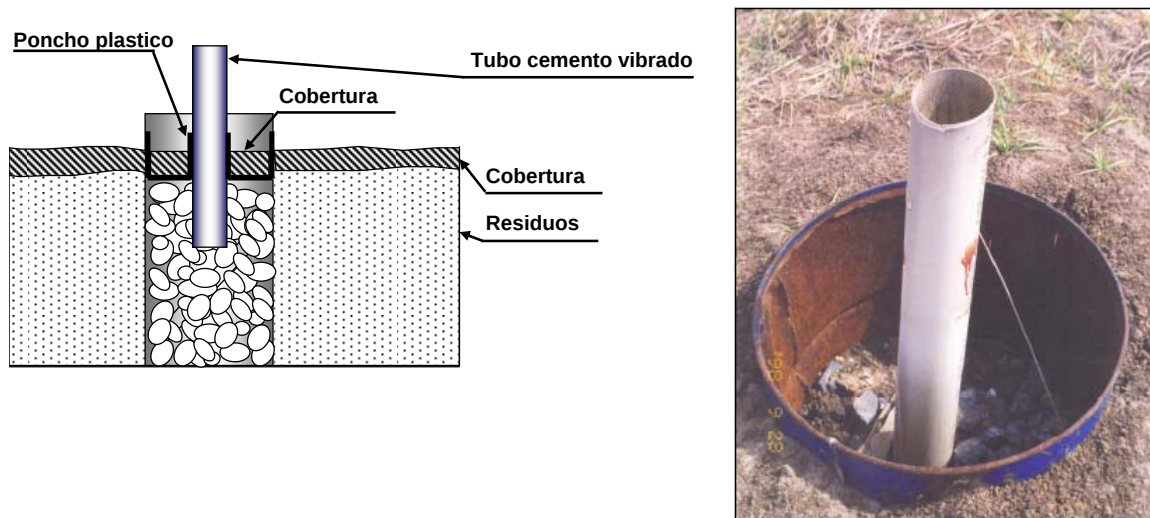


Figura 21. Instalación de tubo de quema de biogás.

Sistemas de drenaje activo

En el sistema activo se realiza una succión del biogás mediante la utilización de bombas. Los gases captados son conducidos posteriormente a un incinerador mediante un sistema de tuberías. El incinerador puede quemar el biogás o utilizarlo para generar energía eléctrica.

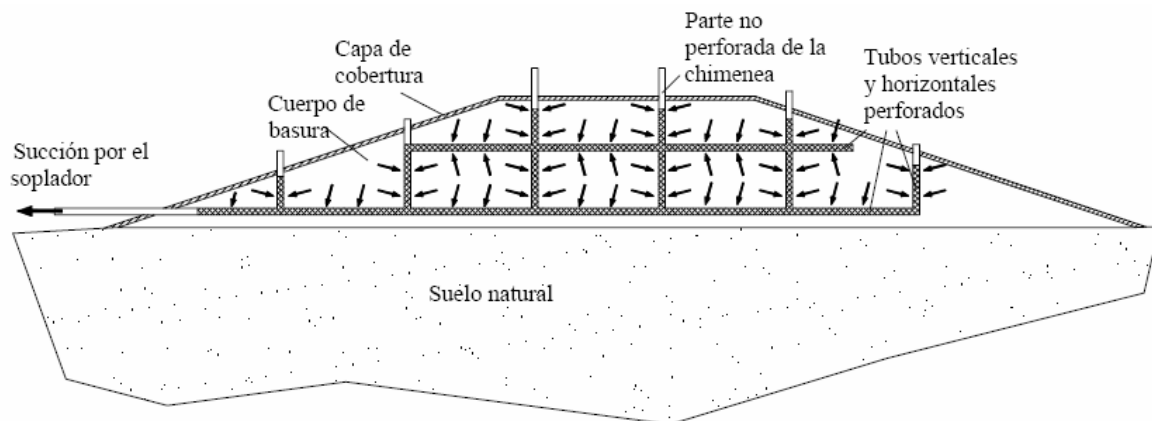


Figura 22. Sistema de tubería al interior de las celdas para el sistema de drenaje activo.

Fuente: Diseño, construcción, operación y cierre de SDF Municipales, Eva Gröven, 2002

El sistema de drenaje activo de biogás cuenta con los siguientes componentes:

Coletores de biogás: Estos son las chimeneas verticales y horizontales dispuestas al interior de la masa del SDF.

Punto de recolección: Este puede ser un estaque o tubo en donde se concentra el biogás captado del SDF. Este debe ubicarse en una cota mas baja que las chimeneas con el fin de poder condensar el agua contenida en el gas. Se debe instalar un equipo de medición y ajuste en este punto.

Separador de agua: Los condensadores captados deben separarse del flujo de biogás mediante un sifón o sistema de refrigeración. Estas aguas deben ser enviadas a la piscina de acumulación o a la planta de tratamiento de lixiviado.

Tubo de aspiración de gas: Este es el tubo que conecta el punto de recolección con la bomba de aspiración.

Ajuste de presión y bomba de succión: La bomba de succión produce la presión (-) necesaria para extraer el biogás de la masa del SDF y la presión (+) necesaria para enviarlo al incinerador. El ajuste de presión mantiene la depresión y la sobre-presión en el nivel óptimo.

Nave o estructura para la bomba de succión: para SDF pequeños se recomienda instalar la bomba de succión en una nave o estructura metálica semiabierto o en un contenedor. Para SDF grandes, se recomienda instalar la bomba de succión en el mismo edificio que el incinerador.

Tubo de transporte: Es la tubería que conduce el biogás con sobre-presión.

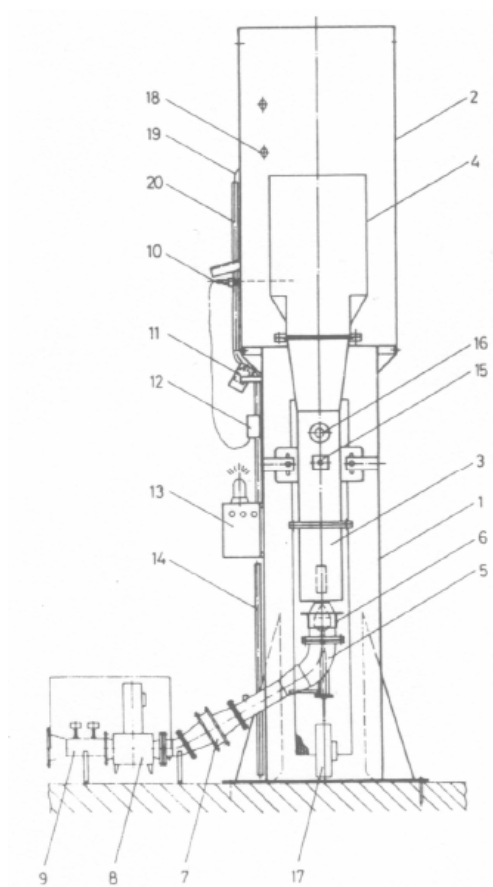
Si no se aprovecha el biogás para la generación de energía eléctrica es necesario, su incineración mediante la utilización de una antorcha. El método de incineración con antorcha es similar al método de incineración en las chimeneas. A continuación se presenta un cuadro comparativo de ambos métodos.

Cuadro 13. Comparación entre incineración en chimenea y antorcha.

Criterio	Incineración en chimenea	Incineración con antorcha
Objetivo	Eliminación del gas metano y de los compuestos odoríferos	Eliminación del gas metano y de los compuestos odoríferos, controlando emisiones de contaminantes como NO _x , SO _x e hidrocarburos halogenados
Punto de incineración	En cada chimenea	En una antorcha fuera de la masa de residuos, a donde se conduce todo el biogás succionado
Método de drenaje	Se puede realizar solamente con drenaje pasivo	Se puede realizar solamente con drenaje activo
Equipo necesario	Quemadores metálicos o de cemento vibrado y ponchos plásticos	Bomba de succión, tubería de conducción, separador de biogás, antorcha especial, equipo de medición y ajuste
Ventajas	- Bajo costo de inversión y operación - No necesita personal calificado para la operación - Se puede utilizar en SDF de cualquier tamaño - Se puede fabricar con materiales disponibles en cada SDF	- Mejor protección del ambiente - Eliminación de contaminantes

Cuadro 13. Comparación entre incineración en chimenea y antorcha (continuación).

Criterio	Incineración en chimenea	Incineración con antorcha
Desventajas	- No se eliminan productos laterales de la incineración - No hay la posibilidad de ajustar los parámetros de incineración - No hay la posibilidad de aprovechar la energía del gas metano	- Costo alto de inversión y operación - Se necesita personal calificado para operación y mantenimiento - Económicamente y técnicamente inadecuado en SDF pequeños y medianos - Tecnología extranjera (problema con reparaciones y repuestos)



Componentes de una antorcha convencional:

1. Chasis
2. Tapa para protección de llama
3. Tubo para mezclara
4. Tubo de incineración
5. Tubo de inyección
6. Orificio de ajuste
7. Seguridad contra llama
8. Válvula de gas
9. Tubo de gas
10. Electrodo del encendedor
11. Protección contra los rayos UV
12. Transformador del encendedor
13. Panel de control
14. Cables eléctricos
15. Termostato
16. Protección contra heladas
17. Árbol motor
18. Protección de calor
19. Líneas de equilibrio
20. Tubo protector

Figura 23. Esquema de antorcha convencional.

Fuente: Diseño, construcción, operación y cierre de SDF Municipales, Eva Gröven, 2002

4.3 Manejo de lixiviado en el SDF

7.3 Debe construirse un sistema que garantice la captación y extracción del lixiviado generado en el sitio de disposición final. El lixiviado debe ser recirculado en las celdas de residuos confinados en función de los requerimientos de humedad para la descomposición de los residuos, o bien ser tratado, o una combinación de ambas.

Sistema de captación, colecta y extracción de lixiviado

Para los SDF de los tipos A al C (y se recomienda para los tipos D), el sistema de captación de lixiviado deberá instalarse inmediatamente por encima del sistema de impermeabilización. Estos sistemas serán capas drenantes ubicadas en la base del SDF y sobre cualquier capa superior donde se espere tener acumulación de líquidos. Dependiendo del diseño se podrán instalar tuberías ranuradas, ya sea en terrazas con pendiente en la base del SDF o en forma de “espina de pescado”. Este último recomendado para SDF de trinchera o en depresión.

La función de la capa drenante instalada sobre el sistema de impermeabilización tiene como finalidad captar y conducir los lixiviados generados por la humedad propia de los residuos y por la infiltración de aguas lluvias a la masa de residuos, a las piscinas de acumulación y evaporación, la planta de tratamiento de lixiviado o a los cárcamos para su rebombeo en el cuerpo de residuos. Como la producción de lixiviados se mantendrá durante varios años después del cierre del SDF, el sistema de drenaje debe estar bien construido y ser resistente.

La capa de drenaje se construye generalmente utilizando grava o piedra bola. El material utilizado debe ser de tamaño grande, homogéneo y no contener material fino, asegurando de esta manera, una buena conductividad hidráulica en el tiempo. Se recomienda un espesor de la capa de drenaje, para asegurar una buena conductividad hidráulica en el tiempo de 50 cm. Los criterios para la selección del material, grava o piedra bola, se presentan en la siguiente tabla:

Cuadro 14. Criterios de selección de grava o piedra bola para capa drenante.

Espesor de la capa (cm)	50
Dimensiones de la piedra (cm)	Mezcla homogénea $16 < d < 32$ ó $8 < d < 16$
Proporciones de la piedra	Redondas (largo/ancho $< 3/1$)
Contenido de carbonato de calcio	$< 20\%$ (masa)
Permeabilidad (cm/s)	$> 10^{-1}$
Inclinación en el ancho del SDF (hacia el colector principal de lixiviado)	$> 3\%$
Inclinación en el largo del SDF (hacia la planta de tratamiento).	$> 1\%$

Fuente: Modificado de Diseño, construcción, operación y cierre de SDF Municipales, Eva Gröven, 2002.

Sistema tuberías de drenaje.

Para una conducción más eficiente de los lixiviados fuera de la zona de estanqueidad del SDF, se puede instalar en el fondo de la capa de drenaje un sistema de tubos perforados o ranurados, los cuales, deberán ser cubiertos por una capa de material filtrante (geotextil o algún sustituto), que impida que los materiales finos que son arrastrados por el lixiviado colmaten los tubos. La protección de estos puede ser realizada con geotextil, sacos extendidos u otro material equivalente.

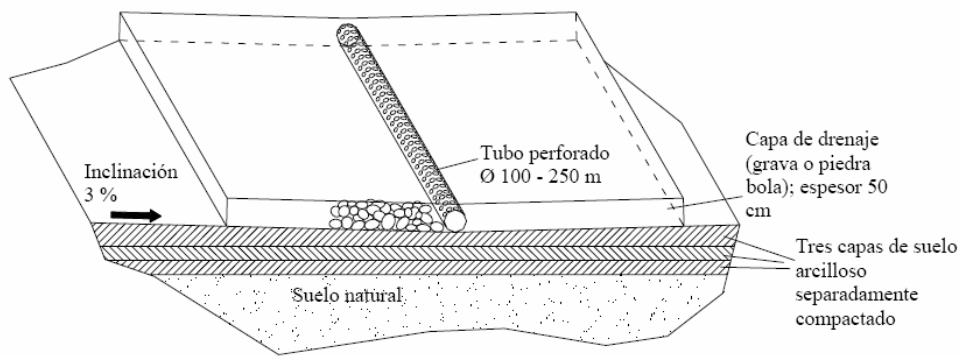


Figura 24. Posición del tubo de captación y conducción de lixiviado dentro de la capa drenante.

Fuente: Diseño, construcción, operación y cierre de SDF Municipales, Eva Gröven, 2002.

Los drenes de recolección de lixiviados, podrán conformarse con tuberías ranuradas hasta la mitad de su diámetro, recomendándose para este fin, tuberías de Polietileno de Alta Densidad (PAD). La tubería se instalará en una cepa, con un ancho mínimo de 40 cm mayor que el diámetro de la tubería. La cepa tendrá en el fondo, una cama de arcilla bentonítica, sobre la que descansará la tubería ranurada con la superficie ciega hacia abajo, acostillándose hasta la mitad de su diámetro. La tubería se empacará con grava en su parte superior, hasta alcanzar el nivel de desplante de la membrana plástica. La cepa tendrá una profundidad variable, definida por la pendiente de la plantilla del dren, la cuál será lo suficientemente grande como para propiciar una velocidad mayor o igual a 0.6 m/s, considerada como la velocidad mínima de arrastre para los lixiviados a gasto máximo, aunque un valor de 0.3 m/s, se considera suficiente en los tramos iniciales de las tuberías de recolección de lixiviados.

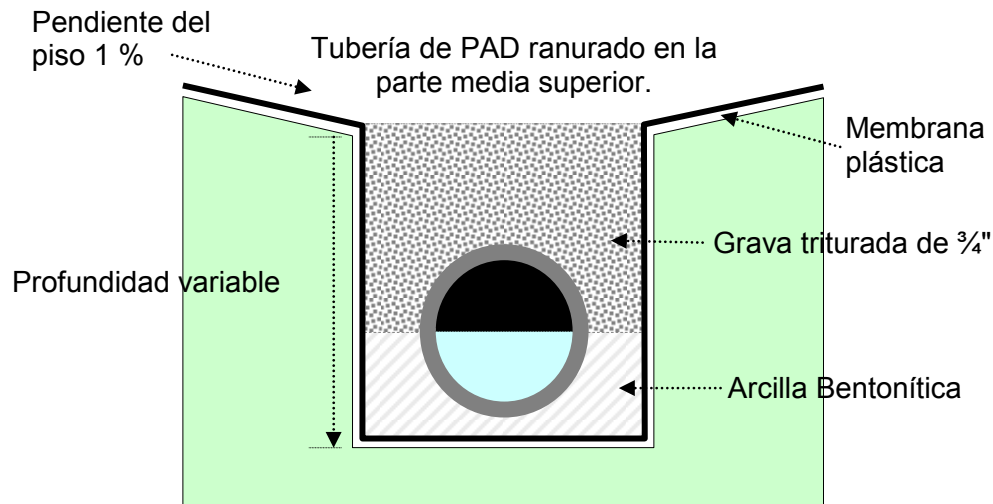


Figura 25. Características de los drenes para la captación y conducción de los lixiviados.

El cálculo del gasto máximo que pueden conducir estos ductos, considerando que el lixiviado presenta un flujo uniforme, se puede utilizar la ecuación de Manning, con un coeficiente de fricción $n = 0.011$; asumiendo como ya se indicó, que el tirante máximo que puede llevar el dren es igual a la mitad del diámetro, ya que la parte superior del dren está ranurada para dar entrada a los lixiviados.

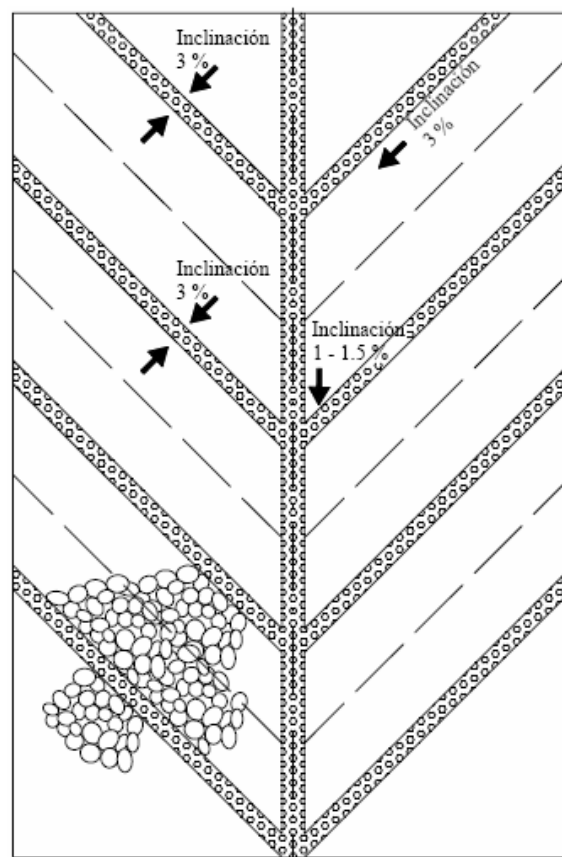


Figura 26. Colocación de tubería de captación y conducción de lixiviado según sistema "espina de pescado".

Fuente: Diseño, construcción, operación y cierre de SDF Municipales, Eva Gröven, 2002.

Existen diferentes geometrías de diseño para las tuberías de captación y conducción de lixiviado. Una de estas geometrías, conocida como espina de pescado, permite asegurar una conducción rápida y eficiente fuera de la zona de estanqueidad del SDF. Para este diseño se deben proyectar en la base de la construcción surcos con una pequeña pendiente sobre los cuales se dispondrán las tuberías. Para el diseño de las pendientes deben considerarse los asentamientos del suelo antes, durante y después de la operación del SDF.

El diámetro de los tubos puede variar entre 100 y 250 mm, dependiendo de la cantidad de lixiviado proyectado. El área total de orificios deberá ser superior a 100 cm/m y el diámetro de estos debe impedir el ingreso de piedras o grava que congestionen el sistema.

Los tubos pueden ser de PVC o HDPE (u otro plástico duro). Se debe considerar que el sistema de tuberías estará expuesto a diferentes sistemas de carga durante la vida útil del SDF, y hasta después de su clausura, por lo que se deberá tomar en consideración la resistencia de los tubos al momento de realizar la adquisición de éstos.

En caso de no contar con los recursos necesarios para la instalación de tuberías de captación y conducción de lixiviado, se podrán construir otros sistemas alternativos, como por ejemplo canales de drenaje SDFs con grava o piedra bola.

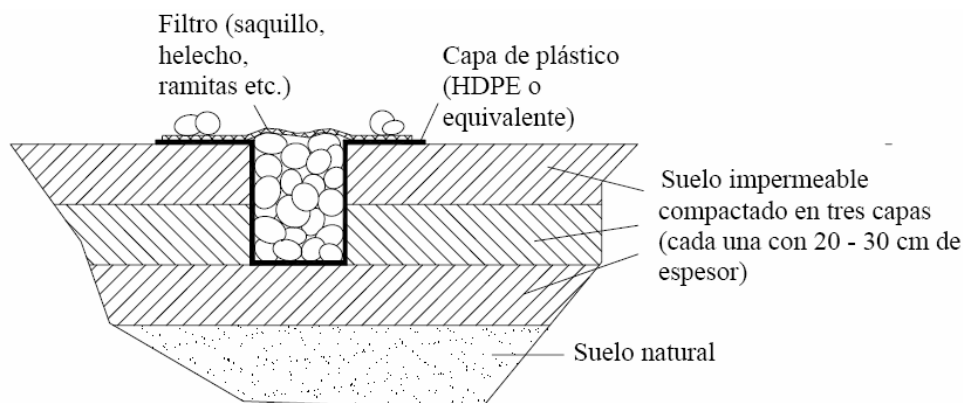


Figura 27. Canal de drenaje de lixiviados.

Fuente: Diseño, construcción, operación y cierre de SDF Municipales, Eva Gröven, 2002.

Se recomienda construir los canales de drenaje con un ancho no menor a 0,50 m y llenarlos con grava o piedra bola con las mismas características descritas anteriormente en el Cuadro 14. Los canales deben cubrirse con geotextil, sacos extendidos u otro material equivalente, con el fin de evitar que se sature o colmate el sistema por el arrastre de material fino arrastrado por el lixiviado.

Otra alternativa para la construcción de canales de drenaje, es mediante la utilización de neumáticos en desuso. Este sistema se recomienda en lugares donde no existe un sistema de reciclaje de estos y donde no es posible el suministro de bola o grava. Con

este sistema se da solución al problema de disposición de neumáticos y se gana volumen para la disposición de los residuos.

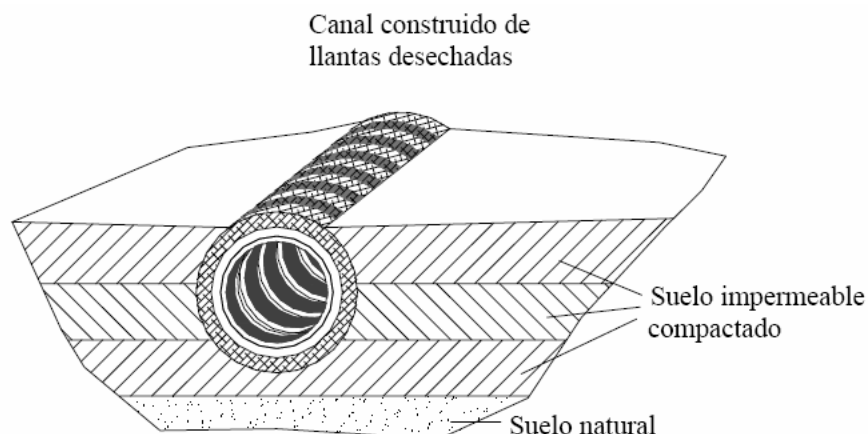


Figura 28. Canal de drenaje construido con neumáticos en desuso.

Fuente: Diseño, construcción, operación y cierre de SDF Municipales, Eva Gröven, 2002.

En la parte superior de los neumáticos, dispuestos en la zanja, se les debe realizar una perforación con el fin de mejorar la infiltración. Sobre los neumáticos se colocará piedra bola o grava, después cubrir esta cama de material granular con un geotextil, saco extendido, helecho o pasto.

PARAMETRO	MES											
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
PRECIPITACION P_1 (mm)	9.6	4.77	2.47	2.32	29.16	141.99	213.96	143.3	113.04	30.35	10.6	9.93
ESCURRIMIENTO $ES=K_e \cdot P_1$ (mm)	1.25	0.62	0.32	0.3	4.96	24.14	36.37	24.36	19.22	5.16	1.38	1.29
INFILTRACION $I_1=P_1-ES_1$ (mm)	8.35	4.15	2.15	2.02	24.21	117.85	177.58	118.94	93.82	25.19	9.22	8.63
EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL AJUSTADA $EC_1=K_c \cdot EP_1$ (mm)	45.3	51.91	72.82	97.36	117.7	110.25	89.27	86.02	78.54	72.62	58.03	47.64
DIFERENCIA I_1-EC_1 (mm)	-36.95	-47.76	-70.67	-95.35	-93.49	7.6	88.32	32.92	15.28	-47.43	-48.81	-39.01
CAPACIDAD DE ABSORCION DEL SUELO (ESPESOR 20 cm) $HS=40 \text{ mm}/20 \text{ cm}$	0	0	0	0	0	0	40	40	40	40	0	0
DIFERENCIA DE CAPACIDADES MES A MES DHS_1 (mm)	0	0	0	0	0	7.6	32.4	0	32.4	-40	0	0
EVAPOTRANSPIRACION REAL $ER_1=EC_1$; SI $I_1-EC_1 > 0$ $ER_1=I_1-DHS_1$; SI $I_1-EC_1 < 0$ (mm)	8.35	4.15	2.15	2.02	24.21	110.25	89.27	86.02	78.54	65.19	9.22	8.63
PERCOLACION MENSUAL $PERC_1=I_1-DHS_1-ER_1$ (mm)	0	0	0	0	0	0	55.92	32.92	15.28	0	0	0
PERCOLACION ANUAL = 104.12 mm/año												

Figura 29. Balance hídrico para el calculo de producción de lixiviado.

Es importante señalar que en el proceso de evaluación de este punto se debe considerar principalmente las precipitaciones anuales proyectadas y las precipitaciones puntas (mayor cantidad de lluvias en un mes determinado); esta información en conjunto con el área a evacuar podrá dar un valor aproximado de la capacidad que debe tener el sistema de captación y drenaje de lixiviados.

4.4 Procesos para el tratamiento y control de los lixiviados

Al filtrarse el agua través de los residuos sólidos en descomposición, estos se contaminan y lixivian con soluciones de materiales biológicos y componentes

químicos. Los sólidos suspendidos y la turbidez pueden estar presentes en el lixiviado debido al permanente lavado de los materiales sólidos finos presentes en los residuos. Contiene también materiales orgánicos y sales solubles en disolución. La materia orgánica disuelta le da al lixiviado su color marrón oscuro, la mayoría de esta materia orgánica en los residuos tiene baja solubilidad, sin embargo la biodegradabilidad de esta materia tiende a producir productos finales solubles, como ácidos orgánicos simples y alcoholes. Todos estos productos, derivados de reacciones bioquímicas, liberan durante su formación productos finales gaseosos.

La biodegradabilidad del lixiviado varía con el tiempo, pudiendo monitorearse sus cambios, mediante el control de la relación DBO₅/DQO. 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 lixiviados viejos provenientes de celdas antiguas, la relación DBO₅/DQO está a menudo en el rango de 0.05 a 0.2. La relación cae porque estos lixiviados contienen ácidos húmicos y fúlvicos, que no son fácilmente biodegradables.

Por lo anterior, es obvio que la composición química de los lixiviados variará en función de la antigüedad del SDF; por lo que los lixiviados durante la fase ácida de la descomposición, tendrán un pH bajo, con concentraciones altas de DBO₅, COT, DQO, nutrientes y metales pesados. Similarmente serán más bajas las concentraciones de metales pesados, por que en su mayoría, son menos solubles para valores de pH neutros.

El pH del lixiviado, dependerá no solamente de la concentración de los ácidos que están presentes, sino también de la presión parcial del CO₂ en el biogás que está en contacto con él.

Por lo descrito anteriormente, pretender tratar a los lixiviados como si fueran aguas residuales domiciliarias sería, sería un craso error; de hecho, su manejo y tratamiento es mucho más complicado, por las siguientes razones:

- Los lixiviados presentan valores de DQO hasta 200 veces mayores, que los correspondientes a las aguas residuales domiciliarias.
- Su composición y volumen varían de manera considerable estacionalmente. La eficacia de los tratamientos biológicos y otros procesos físicos favorables, tales como la evaporación, se ven reducidos por las temperaturas bajas de invierno, precisamente cuando la producción de lixiviados es mayor.
- Cuando se diseñan los procesos para el tratamiento de los lixiviados, con la caracterización de un líquido percolado joven, la eficacia del tratamiento va disminuyendo a medida que el SDF envejece, por lo que es normal que se tengan que rediseñar las instalaciones de tratamiento para no quedar obsoletas.
- El diseño de un método general para el tratamiento de lixiviados, se ve impedido por su gran variabilidad, por lo que los procesos que se han desarrollado en un determinado lugar con cierto éxito, no sean aplicables en otro.

Las opciones más conocidas y utilizadas para el control y tratamiento de los lixiviados, se describen a continuación:

Evaporación de lixiviado

Uno de los sistemas más sencillos para la gestión de lixiviados implica el uso de estanques recubiertos para la evaporación de lixiviados. En lugares lluviosos, la instalación para el almacenamiento de lixiviados se cubre con una membrana sintética, durante la época de lluvias, para evitar que se incremente el volumen de dichos líquidos. Posteriormente, los lixiviados acumulados se mantienen en evaporación durante los meses cálidos del verano, destapando la instalación de almacenamiento y/o regando el lixiviado permanentemente sobre las superficies terminadas del SDF.

Reinfiltración de lixiviado

Si bien es cierto que la reinfiltración de los lixiviados dentro del SDF se puede realizar a través de las estructuras de captación del biogás, su descarga en el frente de trabajo o el riego en las superficies expuestas son métodos muy socorridos en nuestro medio para el control de los lixiviados, también es cierto que son los más ineficientes, ya que se hacen sin sustento técnico y sin un control ambiental básico, pudiendo propiciar el deslizamiento de los taludes de residuos al humedecerla en demasía, así como propiciar fomentar un ambiente cargado de aerotransportables de carácter patógeno. Por lo regular este método va acompañado de una concentración previa de los lixiviados en lagunas de todo tipo.

Solidificación y encapsulamiento

Un método alternativo muy interesante, altamente rentable y económico, es mezclar el lixiviado con material terreo arcilloso, con sales minerales insolubles o con una mezcla de ambos; esto con el fin de reducir los líquidos en exceso hasta solidificarlos, para después utilizarlos como material para la cobertura de los residuos en nuevas celdas o para su confinamiento dentro del propio SDF.

Tratamiento conjunto con aguas residuales

El tratamiento consiste en evacuar el lixiviado por la red de alcantarillado o transportarlo en unidades motorizadas hasta instalaciones para el tratamiento de aguas residuales, si las normas lo permiten. En este sentido habría que destacar las dificultades en el uso de los conductos del sistema de alcantarillado, ya que en función de la distancia, se podrían producir sedimentaciones de materiales, posibles obstrucciones y producción de gas.

Una de las dificultades que puede presentarse es la alta concentración de componentes orgánicos e inorgánicos aportadas por el lixiviado. Solamente cuando los lixiviados constituyen menos del 5% del total de agua residual a tratar en la planta y el contenido de DQO es menor que 1000 mg/l el tratamiento conjunto es aceptable. De cualquier manera, el lixiviado podría ser diluido antes de ser descargado en las plantas de tratamiento, por lo que el tiempo de retención del agua residual podría aumentarse (Boyle y Ham, 1974).

Otros problemas que pueden presentarse consisten en la corrosión, reducción de la sedimentalidad del lodo y problemas operacionales en la planta debido a la precipitación de óxidos de hierro (Cossu, 1982). Además, la alta concentración de metales, puede inhibir la actividad biológica del lodo y reducir o eliminar la posibilidad de su posterior aplicación como fertilizante (Bekkers y Kasper, 1981).

Tratamiento biológicos aerobios

Los procesos biológicos aerobios son aquellos que se precisan para la oxidación de la materia orgánica. En este proceso, la materia orgánica es transformada principalmente a CO_2 y a productos biológicos sólidos (lodos). Los tratamientos aerobios que se han utilizado en condiciones limitadas son las lagunas aerobias, los lodos activados y los biofiltros, obteniéndose rendimientos en aproximadamente un 95% en eliminación de DQO; esto se debe a que para aplicar estos tratamientos con eficacia, se requieren condiciones más o menos estables, situación que evidentemente no puede ser satisfecha por la variabilidad de los lixiviados.

Tratamientos biológicos anaerobios

Los tratamientos anaerobios son los más ampliamente utilizados en el tratamiento de lixiviados; esto es debido a que soportan muy bien las sobrecargas puntuales de contaminación que arrastra el lixiviado. En los procesos anaerobios la materia orgánica es convertida en biogás, una mezcla que contiene principalmente CO_2 y CH_4 y en menor medida lodos biológicos.

Un importante hecho derivado del tratamiento anaerobio es la posibilidad de usar el metano producido para calentar el digestor, ya que usualmente trabaja a 35°C , o bien bajo condiciones favorables usarlo para otros propósitos externos.

Un estudio comparativo sobre la eficacia del tratamiento anaerobio de lixiviados procedentes de dos SDF similares, difiriendo solamente en la edad de ellos, mostró que el porcentaje de DQO eliminado es mayor cuando los lixiviados tratados provienen de SDF jóvenes, debido a que contienen un menor porcentaje de materiales refractarios. El filtro anaerobio de flujo ascendente utilizado en este estudio, trabajando para un tiempo de retención hidráulico de menos de 2 días, resultó ser muy estable cuando se mantuvieron las condiciones de operación sin grandes perturbaciones (Lemahn et al, 1987).

Tratamiento físico-químico-físico-químico

Los tratamientos físico-químicos, por lo regular requieren poco tiempo para su puesta en marcha, simplicidad de equipamiento y material, fácil automatización y poca sensibilidad a los cambios de temperatura. Entre las desventajas se pueden citar entre otras, un porcentaje de eliminación de la DQO muy bajo (45%), costos de operación elevados por la utilización de productos químicos y posible toxicidad derivada del propio uso de compuestos químicos.

El tratamiento de lixiviados por precipitación química, mejora la eliminación del color, contenido de sólidos en suspensión, amonio y eliminación de algunos cationes pesados.

Sin embargo, este tratamiento no obtiene buenos rendimientos en eliminación de materia orgánica (<40% de la DQO), presentando además el inconveniente de la producción de una gran cantidad de sedimentos debido a los reactivos añadidos.

El tratamiento de los lixiviados por oxidación química con Cl_2 , KMnO_4 , y O_3 , obtiene mejores resultados para la eliminación del color, que la propia precipitación química, en donde la reducción de DQO es insuficiente <48%.

El uso de oxidantes halogenados presenta además el inconveniente de generar compuestos órganohalogenados altamente peligrosos, como se han detectado en algunos casos de cloración de lixiviados (Gould y Ramsey, 1983).

El tratamiento de los lixiviados por absorción en columnas de carbón activo en forma de polvo alcanza mejores resultados en la eliminación de la materia orgánica que los métodos químicos (Chian y de Walle, 1976). El mayor inconveniente que presenta este tratamiento es la necesidad de regenerar frecuentemente las columnas de carbón con un alto consumo del carbón en polvo.

La ósmosis inversa presenta una alta eficacia en la eliminación de sales inorgánicas, teniendo además la ventaja adicional de eliminar la materia orgánica disuelta mediante el paso del lixiviado a través de una membrana semipermeable (generalmente acetato de celulosa o nylon), que actúa como un filtro de los iones y de la materia orgánica.

Recirculación de lixiviados inoculados con biomasa metanogénica

Un método sumamente eficiente para el tratamiento de lixiviados consiste en recogerlos y recircularlos a las celdas de residuos del SDF. Durante las primeras etapas del funcionamiento de cualquier SDF, el lixiviado contendrá cantidades importantes de SDT, DBO_5 , DQO, nutrientes y metales pesados. Cuando se recircula el lixiviado se atenúan y diluyen los compuestos producidos por la actividad biológica, y por otras reacciones químicas y físicas que se producen dentro del SDF. Por ejemplo, los ácidos orgánicos sencillos presentes en el lixiviado, se convertirán en CH_4 y CO_2 . Por el incremento del valor del pH cuando se produce el CH_4 ; los metales se precipitan y son retenidos dentro del sitio.

Un beneficio extra de la recirculación formulada de los lixiviados, es la recuperación del biogás que contiene CH_4 ; de hecho, la tasa de producción de este energético es mayor en sistemas que cuentan con recirculación de lixiviados. Asimismo, si el lixiviado, previo a su recirculación, es reformulado para transformar la carga orgánica soluble (nutrientes) en biomasa metanogénica y se acondiciona en un reactor anaerobio con flujo ascendente especialmente concebido para extraer un licor rico en microorganismos metanogénicos, es posible acelerar los tiempos de estabilización de los residuos dentro del SDF, reduciéndolos de 30 años al menos, a 5 o 7 años a lo sumo.

La recirculación supone el uso del SDF como un filtro anaerobio para el tratamiento de los lixiviados. Además del contenido de agua, es necesario el control del pH para la estabilización de los residuos sólidos en condiciones anaerobias, parámetro que debe mantenerse próximo a la neutralidad, ya que una variación del mismo originaría una

caída de la actividad microbiana y por lo tanto una disminución del tiempo para la estabilización biológica. Otro factor que debe tenerse en cuenta, es la hidrología del SDF, debiéndose realizar medidas para asegurar una distribución uniforme del lixiviado recirculado y evitar la formación de canales preferenciales a través de los residuos.

4.5 Manejo de aguas lluvias (escorrentía superficial)

Las obras de drenaje en un SDF tendrán como finalidad la captación, conducción y evacuación de los escurrimientos superficiales que fluyan hacia las instalaciones, ocasionados por las precipitaciones pluviales, por el escurrimiento del agua de terrenos adyacentes o bien por las crecientes de ríos o arroyos. En particular, para la conducción de los escurrimientos, es necesario construir canales, cunetas y canaletas.

Para los primeros (canales), las secciones más utilizadas son la trapecial y la rectangular. Las cunetas y canaletas, son de sección parabólica o triangular, siendo más común ésta última, por su facilidad de construcción. En cualquiera de los casos, el diseño deberá atender el gasto máximo que debe conducir, donde las variables más importantes, son la sección hidráulica y la pendiente del conducto. Se supone que el flujo del agua sobre el conducto será uniforme, por lo que el modelo hidráulico a utilizar es el de Manning.

Por otro lado, dentro de los objetivos principales de las obras de drenaje están:

- Prevenir que la escorrentía superficial fluya sobre el SDF y entre en contacto con los residuos sólidos;
- Controlar que la escorrentía no se desvíe del área activa del SDF y forme charcos o condiciones de suelos saturados en el SDF y áreas periféricas;
- Proveer medidas para controlar la erosión y sedimentación a fin de prevenir la acumulación de sedimentos en las vías de drenaje y áreas bajas, así como para proteger los recursos hidráulicos aguas abajo.

Este tipo de obras pueden clasificarse de acuerdo a sus funciones en obras de drenaje interior y exterior. Las primeras tendrán como función principal permitir el rápido drenaje del agua pluvial precipitada sobre el sitio, ya que puede impedir la correcta operación de la instalación. Las obras de drenaje exterior, tienen como finalidad impedir que el agua de lluvia proveniente del exterior, penetre al SDF de residuos sólidos.

De acuerdo a la topografía del sitio, estas obras pueden habilitarse mediante canales abiertos, canales cerrados (tuberías), diques y muros de contención; acompañados en algunos casos, con cárcamos y equipos de bombeo cuando es necesario salvar alguna altitud o punto elevado.

Para condiciones topográficas suaves y poco pronunciadas, es mejor utilizar canales abiertos para el desvío de las corrientes provenientes de las áreas circundantes.

Si el sitio de interés es una trinchera o una depresión, pueden utilizarse cárcamos y equipos de bombeo para mantener al sitio libre de inundaciones.

Finalmente, cuando el sitio se ubique en un terreno plano inundable, deberá protegerse contra inundaciones mediante diques o muros de contención.

Por lo anterior, es importantísimo determinar tanto las intensidades de lluvia, como los coeficientes de escurrimiento, el área de aportación, datos de la pendiente y forma de la cuenca; con el fin de calcular correctamente los gastos de diseño para los canales y cunetas de drenaje empleando el Método Racional Americano.

Una práctica usual es diseñar los canales en forma trapecial, con un tirante de 30 a 60 cm y un talud de 1:1, con lo cual, el fondo del canal queda aproximadamente 40 ó 45 cm debajo del nivel del terreno, buscando con ello seguir la misma pendiente de éste, evitando con ello, realizar excavaciones excesivas que podrían encarecer el costo de las instalaciones, ya que, como es bien sabido, en una obra de ingeniería civil las obras de terracería representan uno de los conceptos mas costosos.

Por lo regular, las obras de drenaje son revestidas con mortero cemento-arena en proporción de 1:3; o bien, mediante un zampeado de piedra junteada con cemento-arena en proporción de 1:5 y espesor máximo de 10 cm.; aunque también es posible utilizar materiales alternativos, como son las sales minerales combinadas con suelos arcillosos.

Las aguas captadas en los canales normalmente son encausadas a un colector, éste puede ser un dren natural (río, arroyo, etc.) ó artificial (línea de drenaje pluvial entubada); aunque en ocasiones también pueden ser llevadas a lagunas de concentración, con el fin de aprovecharlas en distintas actividades como en el riego, lavado de pisos, limpieza, etc.

Para calcular la sección hidráulica del drenaje, se deberá utilizar la fórmula de Manning, la cual se describe a continuación:

$$Q = A \cdot V$$
$$V = \frac{r^{\frac{2}{3}} s^{\frac{1}{2}}}{n}$$
$$r = \frac{A}{P}$$

Donde:

Q = Es el gasto, en m³/s.

A = Es el área hidráulica, en m²

V = Es la velocidad de escurrimiento, en m/s.

n = Es el coeficiente de rugosidad

r = Es el radio hidráulico, en m.

S = Es la pendiente, en milésimas

P = Es el perímetro mojado de la sección hidráulica, en m.

Para la estimación del gasto máximo es necesario tomar en cuenta dentro del periodo de registros climatológicos que se hayan consultado, las precipitaciones medias mensuales, máximas diarias en 24 horas, así como el número de días en que se hayan presentado precipitaciones mayores a 1 mm.

Por lo regular, se consideran duraciones de 10, 30, 60, 120 y 240 minutos para un período de retorno de 10 años. Para periodos de retorno mayores, al requerirse mayores secciones en los conductos, se pueden encarecer de manera importante las obras de drenaje.

El método más común para el cálculo del gasto máximo en cuencas pequeñas, es el conocido como Método Racional Americano. Para el cálculo del gasto, este método tiene la siguiente expresión:

$$Q_p = 0.278 \cdot C \cdot I \cdot A$$

Donde:

Q_p = Gasto máximo (m^3/s)

C = Coeficiente de escurrimiento (adimensional)

I = Intensidad de la lluvia crítica, para una duración igual al tiempo de concentración (mm/hr)

A = Área de la cuenca (km^2)

El valor de C que aparece en la fórmula del Método Racional Americano, está en función del tipo de terreno y de la topografía.

La intensidad de la lluvia (I), debe obtenerse tomando en consideración el periodo de retorno (Tr), que a su vez depende del riesgo de que se acepte para que la estructura falle hidráulicamente y también de su vida útil. La intensidad de la lluvia crítica, es aquella responsable del mayor caudal en la sección considerada, con una duración igual al tiempo de concentración.

Por lo antes mencionado, se requiere determinar previamente el tiempo de concentración de las cuencas por drenar, éste puede obtenerse empleando alguna de las expresiones empíricas que existen para evaluarlo.

Con los resultados del (T_c) para cada cuenca, es posible determinar los valores de la intensidad de la lluvia correspondiente para los períodos de retorno que se pretenden considerar.

4.6 Área de emergencia

Definiremos el área de emergencia como el lugar preparado para la recepción segura de residuos sólidos en el caso que se produzca una situación de emergencia en el frente de trabajo, como serían inundaciones, deslizamientos, terremotos, lluvias torrenciales o accidentes que pueden ser explosiones, incendios, choques y emergencias ambientales. El área de emergencia deberá contar con una señalización clara y caminos expeditos. Contará con drenajes de aguas lluvias y un depósito de cobertura cercana. Las condiciones de operación serán iguales o mejores a las del

frente de trabajo y una vez superada la situación de emergencia se volverá al frente de trabajo normal.

El proyecto ejecutivo de ingeniería debe incluir el diseño del área de emergencia con sus especificaciones técnicas y planos correspondientes. Las dimensiones de las celdas de emergencia diarias deberán tener las mismas dimensiones de una celda diaria en operación normal.

A continuación se proponen algunas soluciones a los problemas típicos en algunos SDF generados por malas condiciones climáticas.

Cuadro 15. Problema y propuesta de solución para la recepción de residuos y circulación de vehículos en clima adverso.

Problema	Solución
Camino de acceso enlodado	Añadir ceniza, piedras molidas o residuos de demolición de construcción. Mantener un área de trabajo especial con caminos permanentes
Área de descarga enlodada	Esparcir tierra seca Mantener el equipo de compactación fuera del área de descarga y mover los residuos sólidos de manera perpendicular al área Nivelar el área de descarga levemente para permitir la escorrentía.
Suelo húmedo / no operable	Mantener pilas compactadas e inclinadas y cubiertas con alquitrán o similar.
La permeabilidad / densidad del suelo varía con el diseño	No compactar suelos cuando hay exceso de humedad Proteger suelos
Obstrucción del sistema de colección de lixiviado por la escorrentía	Añadir barreras Limpieza periódica de la red de tuberías
Terrenos secos – imposibilidad de excavar e incremento de la permeabilidad	Cubrir el suelo para prevenir el secado Humedecer el suelo
Suelo congelado	Aislar pilas con hojas, nieve o paja Echar sal al suelo Mantener el suelo bien drenado Remover el suelo continuamente

Fuente: Guía para SDF en países en desarrollo, U.S. EPA.

La descripción del procedimiento para la operación de la zona de emergencia se presenta a continuación:

1. Adecuación del sitio
2. Definición del método a emplear
3. Establecimiento de los elementos básicos de la celda
4. Recepción de los residuos sólidos
5. Registro de los vehículos que ingresan a la zona de operación
6. Operación de las celdas
7. Preparación y colocación de estructuras para la captación del biogás
8. Preparación y habilitación de las estructuras para la extracción y recirculación de lixiviados

9. Cobertura de los residuos y peinado de los taludes
10. Limpieza de las inmediaciones y de la plataforma de trabajo

4.7 Densidad de compactación

7.6 Los sitios de disposición final, de acuerdo a la clasificación antes detallada, deberán alcanzar los siguientes niveles mínimos de compactación:

TABLA No. 3 Requerimientos de Compactación

SITIO		Compactación de los residuos kg/m^3	Recepción de residuos sólidos ton/día
A	A1	Mayor de 700	Mayor de 750
	A2	Mayor de 600	100 – 750
B		Mayor de 500	50 – 100
C		Mayor de 400	10 - 50

El objetivo de la compactación en el SDF es el disponer mayor cantidad de residuos en el menor espacio posible, alcanzándose los siguientes beneficios:

- Se prolonga la vida útil del sitio
- Se reducen los asentamientos
- La relación de vacíos disminuye
- Se controla la dispersión de los residuos previo a su cobertura
- Se obtiene una superficie de desplazamiento más sólida para los camiones de residuos, reduciendo las ponchaduras y fallas en el sistema de sustentación

Para lograr una buena compactación de los residuos y cumplir con las especificaciones señaladas, se deben cuidar los siguientes aspectos:

- Para obtener un mayor peso volumétrico, los residuos deben esparcirse y compactarse en capas de no más de 60 centímetros (2 pies) de espesor en SDF con compactación mecánica, ya que mientras más gruesa sea la capa de residuos, menor será la densidad que se pueda alcanzar con el equipo de compactación.
- El equipo debe realizar el trabajo de compactación operando cuesta arriba, con lo cual, el acabado es más uniforme en toda la superficie del talud puesto que los residuos no rodarán delante de la hoja, apilándose al pie de la pendiente. Además, se aprovecha mejor el peso del equipo y el motor se fuerza menos.
- La compactación con equipos montados sobre orugas permite operar en taludes menores de 3:1; mientras que con los compactadores de ruedas metálicas, se debe mantener un talud no menor de 4:1.
- Una superficie horizontal permite una mayor compactación, pero se incrementan las necesidades del material de cobertura.

- El número de pasadas que realiza el equipo de compactación sobre los residuos, permite hasta cierto punto, lograr una mejor compactación. Al respecto, una pasada se define como un desplazamiento unitario del equipo sobre los residuos en un sentido. Cualquiera que sea el equipo, se deberán efectuar de tres a cuatro pasadas, para lograr los mejores resultados. Más de cuatro pasadas sería ocioso y no se lograría mejorar notoriamente el peso volumétrico.

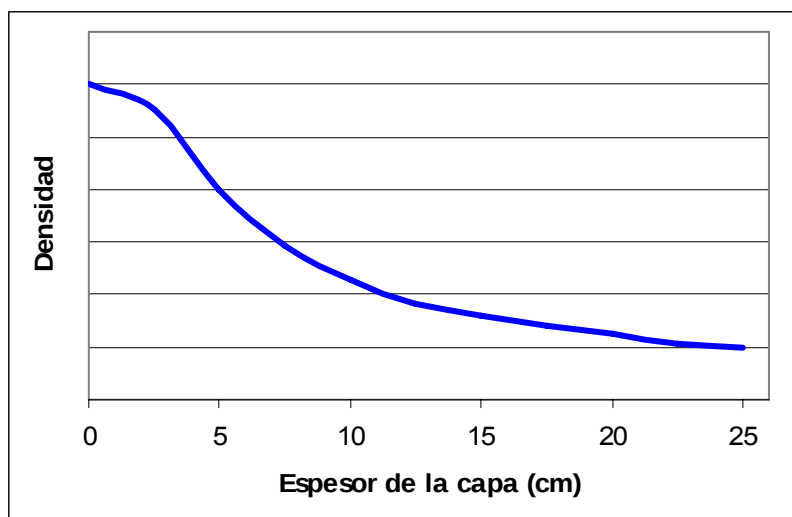


Figura 30. Relación entre el espesor de la capa de residuos sólidos y la densidad relativa compactada del SDF (cuadro representativo, las variaciones de densidad dependen del tipo de máquina).

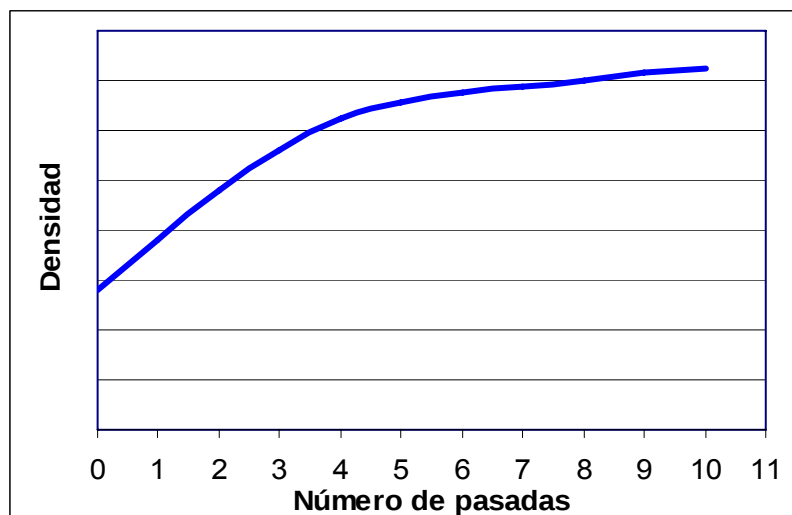


Figura 31. Impacto del número de pasadas sobre la densidad relativa del SDF (cuadro representativo, las variaciones de densidad dependen del tipo de máquina).

Algunos equipos recomendados para la compactación de residuos son:

- Tractor sobre orugas con hoja topadora (Bulldózer)
- Compactadores tipo pata de cabra con hoja topadora
- Cargadores sobre orugas

- Escavadora sobre orugas

No se recomienda el uso de equipos con ruedas neumáticas para operar los residuos debido a las probabilidades de ponchar los neumáticos, lo que provoca un atraso en la operación. Sin embargo se pueden utilizar equipos con ruedas neumáticas para las operaciones de carga de material de cobertura, extendido y compactación de este.

4.8 Control en la operación

7.7 Se debe controlar la dispersión de materiales ligeros, la fauna nociva y la infiltración pluvial. Los residuos deben ser cubiertos en forma continua y dentro de un lapso menor a 24 horas posteriores a su depósito.

Control de dispersión de materiales ligeros.

Se recomienda construir, en el caso de SDF de áreas muy amplias donde la cerca perimetral se encuentra a una considerable distancia del frente de trabajo, cercas portátiles, que dependiendo del tipo de SDF, pueden ir de 1 a 3 (m) de altura. Estas deben disponerse próximas al frente de trabajo y a favor del viento.

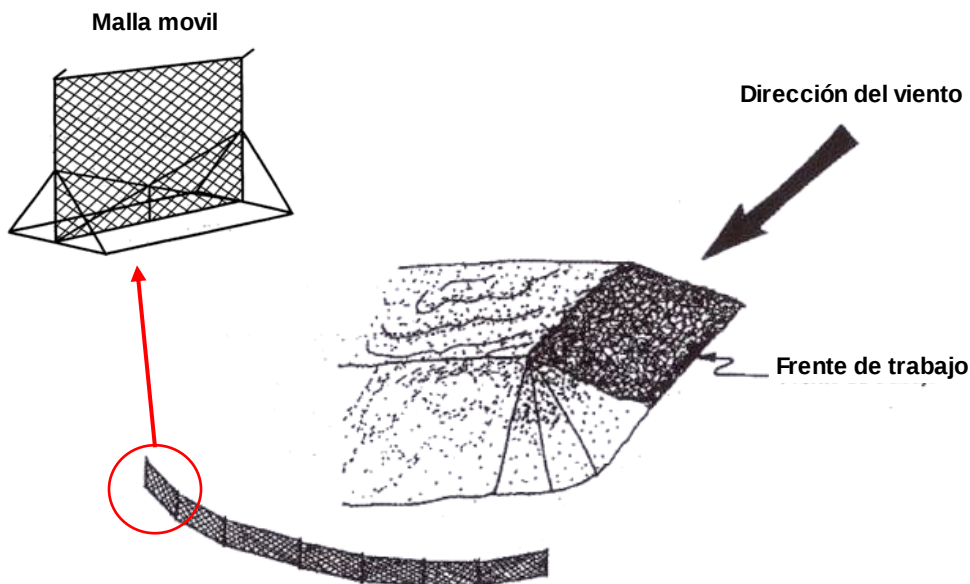


Figura 32. Malla móvil para el control de materiales ligeros en el frente de trabajo.

Como complemento y para evitar la dispersión de materiales fuera de las instalaciones, se deberá tener cuidado de mantener en perfectas condiciones la cerca perimetral, que por lo regular, se habilita para delimitar el sitio.

Control de la fauna nociva.

Para un control efectivo de la fauna nociva (aves, perros, ratas, moscas, etc.) se deberá contar con un cierre perimetral de diseño que impida el acceso de animales grande y pequeños, con mantenimiento periódico, y una cobertura diaria de al menos 15 cm compactada dentro de un lapso menor a 24 horas (para SDF tipo A, B, y C).

Cuando en el SDF se note la presencia de fauna nociva, se deberán aplicar programas de control, como el de desratización, en el caso de la población de roedores, empleando venenos biodegradables.

Control de la infiltración pluvial.

Este es un punto importantísimo, ya que un buen control del ingreso del agua de lluvia al interior del sitio, permitirá reducir las tasas de producción de los lixiviados. Para ello, se hace necesario aplicar las siguientes acciones:

Habilitar un buen sistema de drenaje pluvial, tanto al exterior como al interior de SDF, para minimizar el aporte de humedad a los frentes de trabajo.

Cuadro 16. Criterio de selección de material de acuerdo al uso.

FUNCIÓN DEL MATERIAL DE CUBIERTA	GRAVA LIMPIA	GRAVA CON ALUVIÓN Y ARCILLA	ARENA LIMPIA	ARCILLA CON ALUVIÓN	ALUVIÓN	ARCILLA
Perforar la cobertura de los residuos.	B	A-B	B	M	M	M
Prevenir la aparición de Moscas.	M	A	M	B	B	E
Reducir la expulsión de agua a través del material de cobertura.	M	A-B	M	B-E	B	E
Reducir la infiltración de agua al interior de las celdas de basura.	M	A-B	M	B-E	B	E
Mejorar el acabado de taludes y prevenir la dispersión de material volante.	E	E	E	E	E	E
Soportar el crecimiento de la vegetación.	M	B	M-A	E	B	B
Permitir la ventilación del biogás generado por la estabilización de los residuos.	E	M	B	M	M	M

Fuente: Diseño, construcción y operación de SDF, Brunner y Keller EPA. 1976

E: Excelente, **B:** Bueno, **A:** Aceptable con reserva, **M:** No recomendable sin acondicionamiento.

Cubrir los residuos sólidos al término de las operaciones diarias en los frentes de trabajo, con membranas plásticas, lonas o material terreo, evitando los rezagos al máximo. No debemos olvidar que una de las principales características del SDF, es que diariamente los residuos se cubre a la brevedad, después de haber sido confinada en el frente de trabajo.

Planear, diseñar y operar el SDF, privilegiando su crecimiento vertical sobre la típica operación abarcando grandes extensiones de superficie con espesores reducidos de residuos. De esta manera, se podrá confinar la misma cantidad de residuos en una superficie más pequeña; con lo cual se tendrán menores superficies de residuos expuestas a la precipitación pluvial y por tanto menos producción de lixiviados.

Mantener frentes de trabajo estrechos y en la medida de lo posible, con la mayor altitud que se pueda alcanzar.

Para SDF tipo A, B y C la norma exige una cobertura en un lapso que no supere las 24 hrs. de haber dispuesto los residuos.

4.9 Control de ingreso

7.8 El sitio de disposición final, adoptará medidas para que los siguientes residuos no sean admitidos:

a) residuos líquidos tales como aguas residuales y líquidos industriales de proceso, así como lodos hidratados de cualquier origen, con más de 85% de humedad con respecto al peso total de la muestra.

Los lodos son residuos semilíquidos principalmente producto del tratamiento de aguas, que contiene microorganismos entre otros elementos.

Al disponer lodos con un porcentaje de humedad mayor al 85%, el cual presenta con esta humedad una condición casi líquida, genera un aumento en la producción de lixiviado, posiblemente no contemplado y una disminución en la estabilidad del SDF, llegando a producir fallas y deslizamiento de la masa de residuos.

Para restringir el ingreso de este tipo de residuos, se debe llevar a cabo un control estricto de los residuos que se ingresen al SDF. Posterior a este primer control, el personal del frente de trabajo debe observar siempre las características de los residuos que se descargan, impidiendo o dando aviso en caso de que un residuo no cumpla con lo dispuesto en el reglamento, como por ejemplo, lodos con alto porcentaje de humedad.

Previo a su confinamiento, los lodos deberán ser acondicionados para reducir su humedad. Para ello, existen dos posibilidades: deshidratarlos utilizando equipos mecánicos como son los filtros prensa, los que permiten obtener un lodo sumamente consistente y libre de humedad, como para ser confinado sin ningún problema; la otra opción es la utilización de materiales absorbentes (aserrín, fieltro, etc.) o sales minerales (yeso) para absorber la fase líquida de los lodos.

b) residuos conteniendo aceites minerales.

Los aceites minerales y los lodos aceitosos son materiales que con mucha frecuencia son vertidos clandestinamente y sin ningún control en muchos SDF de residuos sólidos. Al respecto, es fundamental cancelar este tipo de prácticas, ya que además de interferir en los procesos de estabilización de los residuos sólidos, es posible que contengan metales pesados, los cuales en un medio ácido como es el interior de un SDF, se solubilizan incrementando su potencialidad contaminante.

Los probables residuos de este tipo son:

- Tambores de aceites usados, o con residuos de aceite,
- Estopa contaminada con aceite,

- Ropas contaminadas con aceite,
- Productos del tratamiento de aceites usados, etc.

c) *Residuos peligrosos clasificados de acuerdo a la normatividad vigente.*

Los residuos peligrosos son todos aquellos residuos, en cualquier estado físico que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas, representen un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente.

La Norma Oficial Mexicana, NOM-052-SEMARNAT-2005, establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

Es importante establecer un procedimiento para controlar el ingreso de los RME y prohibir el ingreso de los residuos peligrosos. Este procedimiento debe ser respaldado por un manifiesto de cada embarque que se desee disponer en el SDF, el cual debe ser presentado y revisado antes de ingresar. En el manifiesto señalado, se deberá citar la cantidad de residuos por confinar, su procedencia, el generador responsable de los mismos, su estado físico y características intrínsecas, así como el proceso que lo generó.

De forma general, los residuos que no podrán ingresar al SDF son:

- Residuos de las rocas o los productos de su descomposición que sólo puedan utilizarse para la fabricación de materiales de construcción o se destinen para este fin, así como los productos derivados de la descomposición de las rocas, excluidos de la competencia federal conforme a las fracciones IV y V del artículo 5 de la Ley Minera;
- Residuos de servicios de salud, generados por los establecimientos que realicen actividades médico-asistenciales a las poblaciones humanas o animales, centros de investigación, con excepción de los biológico-infecciosos;
- Residuos generados por las actividades pesqueras, agrícolas, silvícolas, forestales, avícolas, ganaderas, incluyendo los residuos de los insumos utilizados en esas actividades;
- Residuos de los servicios de transporte, así como los generados a consecuencia de las actividades que se realizan en puertos, aeropuertos, terminales ferroviarias y portuarias y en las aduanas;
- Lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales;
- Residuos de tiendas departamentales o centros comerciales generados en grandes volúmenes;
- Residuos de la construcción, mantenimiento y demolición en general; y
- Residuos tecnológicos provenientes de las industrias de la informática, fabricantes de productos electrónicos o de vehículos automotores y otros que al

transcurrir su vida útil, por sus características, requieren de un manejo específico.

4.10 Obras complementarias

7.9 Los sitios de disposición final deberán contener las siguientes obras complementarias:

TABLA No. 4. Obras complementarias requeridas de acuerdo al tipo de disposición final

	A	B	C
<i>Caminos de acceso</i>	X	X	X
<i>Caminos interiores</i>	X	X	
<i>Cerca perimetral</i>	X	X	X
<i>Caseta de vigilancia y control de acceso</i>	X	X	X
<i>Báscula</i>	X	X	
<i>Agua potable, electricidad y drenaje</i>	X	X	
<i>Vestidores y servicios sanitarios</i>	X	X	X
<i>Franja de amortiguamiento (mínimo 10 metros)</i>	X	X	X
<i>Oficinas</i>	X		
<i>Servicio médico y seguridad personal</i>	X		

Para cumplir con esta especificación, a continuación se precisan algunos criterios para las principales obras complementarias con que debe estar equipado un SDF de residuos.

Vialidades y equipamiento interno.

Incluyen las jardineras, las vías de comunicación entre edificaciones y el área de estacionamiento.

Esta infraestructura debe ser diseñada, para darle fluidez al movimiento vehicular que tendrá el SDF, así como una imagen agradable a las instalaciones. Particularmente, es importante señalar que debe existir un área donde los camiones recolectores harán su parada o esperarán su turno en el circuito, que iniciará con el pesaje de los mismos.

Cerca perimetral.

Un elemento fundamental para cualquier SDF, es contar con una cerca perimetral que no solamente sirva para delimitar el sitio, sino también para evitar el ingreso incontrolado de vehículos, personas y animales a las instalaciones. Por lo regular se acostumbra colocar malla ciclónica en la parte colindante a las oficinas administrativas y alambres de púas en el resto de la cerca.

Caseta de vigilancia.

Esta caseta deberá ubicarse justo al ingreso del sitio que ocupa el SSDF de residuos. Es común que esté adjunta al portón de acceso a las instalaciones para un mejor control de las entradas y salidas a las mismas. En ocasiones, funge también como caseta de pesaje. Aunque no se acostumbra, se sugiere que cuente con servicios sanitarios.

Agua potable, electricidad y drenaje.

Se sugiere contar con un tanque elevado, para la dotación de agua potable a todo el personal del área administrativa y de mantenimiento. Por lo regular se utilizan tanques con una capacidad de 10 m³.

Todas las edificaciones contarán con energía eléctrica, tanto para el uso de equipos de oficina y electrodomésticos; así como para el desarrollo de las actividades de supervisión, operación, manejo y control de los residuos que se van a dar en el SDF.

Deberá contarse con un sistema de drenaje sanitario y de drenaje pluvial (separado) que permita aprovechar el agua del drenaje pluvial, en actividades de riego, así como darle un adecuado tratamiento a las aguas servidas.

Vestidores y servicios sanitarios.

El Cuadro 17 muestra algunas medidas convencionales para los diferentes servicios al personal. Este cuadro muestra recomendaciones ya que las dimensiones idóneas deben basarse en el proyecto arquitectónico.

Cuadro 17. Dimensiones típicas de los servicios al personal de un SDF.

Batería de inodoros, duchas y mingitorios	3
Vestidor para obreros	20.0 m ²
Baño para la oficina del Residente	4.0 m ²
Vestidor de la oficina del Residente	4.0 m ²
Baños oficinas generales	8.0 m ²
Vestidor oficinas generales	6.0 m ²
Vestidor taller de mantenimiento	6.0 m ²
Baños taller de mantenimiento	8.0 m ²
Oficina de operación	25.0 m ²
Sala de reuniones	30.0 m ²
Cocina y comedor	45.0 m ²
Oficina de supervisión	25.0 m ²
Oficina de mantenimiento	20.0 m ²
Ambiente de primeros auxilios	13.5 m ²

El servicio médico y de seguridad personal, deberá contar al menos con un botiquín completo y mobiliario para la atención médica básica.

4.11 Documentos permanentes requeridos en el SDF

Manual de operación

7.10. El sitio de disposición final deberá contar con:

7.10.a Un manual de operación que contenga:

7.10.a1 Dispositivos de control de accesos de personal, vehículos y materiales, prohibiendo el ingreso de residuos peligrosos, radioactivos o inaceptables.

Control de accesos: Se debe contar con personal que acote y registre el acceso al SDF. En el caso de que exista alguna sospecha de la procedencia de los residuos o no exista registro., Se recomienda inspeccionar la carga y si corresponde, no permitir el ingreso de los residuos al SDF.

7.10.a2 Método de registro de tipo y cantidad de residuos ingresado.

Método de registro: Se debe establecer la forma de registrar el ingreso y disposición de los residuos. Dependiendo de los recursos disponibles este puede ser manual o digital (utilizando una computadora).

7.10.a3 Cronograma de operación

El SDF debe contar con una programación de llenado, debiendo cumplirse las etapas y tiempos propuestos en ella. Esto permitirá verificar las estimaciones y cálculos realizados en el proyecto.

7.10.a4 Programas específicos de control de calidad, mantenimiento y monitoreo ambiental de biogás, lixiviados y acuíferos.

Programas específicos: Tanto el programa como el seguimiento de éste, deben ser realizados por personal y/o profesional con conocimientos en el tema, principalmente lo que se refiere a biogás, lixiviados y acuíferos.

7.10.a5 Dispositivos de seguridad y planes de contingencia para: incendios, explosiones, sismos, fenómenos meteorológicos y manejo de lixiviados, así como sustancias reactivas, explosivas e inflamables.

Seguridad y contingencias: Este tipo de dispositivos y planes debe ser realizado y verificado cada cierto tiempo por un profesional idóneo en el tema, como por ejemplo un Ingeniero en Seguridad Industrial.

7.10.a6 Procedimientos de operación

Parámetros de operación

El desarrollo de una buena operación permite disminuir los riesgos de contaminación al ambiente, eliminar los elementos nocivos para la salud y mantener un mejor control de los costos. Los puntos más relevantes a definir en la operación son:

La descarga de residuos en el frente de trabajo. Los residuos deben ser descargados en el frente de trabajo. Para ello es importante guiar al conductor del camión recolector. El acceso al frente de trabajo debe ser expedito, permitiendo el ingreso a este incluso en condiciones de lluvia sin que los vehículos queden atascados. Una deficiente cobertura provocará atascamientos en el frente de trabajo estando obligados a operar la celda de emergencia.

Disposición y compactación de los residuos. Existen muchas metodologías para la disposición y compactación de los residuos, dependiendo de la forma y topografía del SDF. Es muy importante una buena compactación de los residuos ya que extiende la vida útil del SDF y mejora la estabilidad de este.

Los residuos deben ser dispuestos homogéneamente y en capas delgadas, para mejorar los resultados de la compactación. El número de pasadas dependerá del equipo con que se cuente en el SDF, sin embargo un número deficiente de pasadas generará una pérdida en la vida útil del SDF y un exceso de pasadas propiciará una pérdida innecesaria de horas máquina.

Pendientes, taludes y cortes de las terrazas del SDF. Es importante que el diseño y operación del SDF aseguren la estabilidad tanto del fondo, como de los taludes de éste. Es muy importante, si se considera disponer todos los residuos en el SDF o si se realiza una valorización de los residuos orgánicos recuperables, en cuyo caso los residuos que se disponen finalmente en el SDF tienen características muy parecidas a un suelo natural, siendo más fáciles de compactar y con menos riesgo de deslizamientos.

Al diseñar el SDF se deben tener en consideración dos tipos de inclinaciones: la inclinación del terreno y la inclinación de los taludes de la masa de residuos. Si bien una mayor inclinación del talud del SDF permite un aumento del volumen disponible para la disposición de residuos, baja la estabilidad de la masa de residuos aumentando las posibilidades de deslizamientos. En un país sísmico, como México, la estabilidad dinámica de la masa de residuos es especialmente importante.

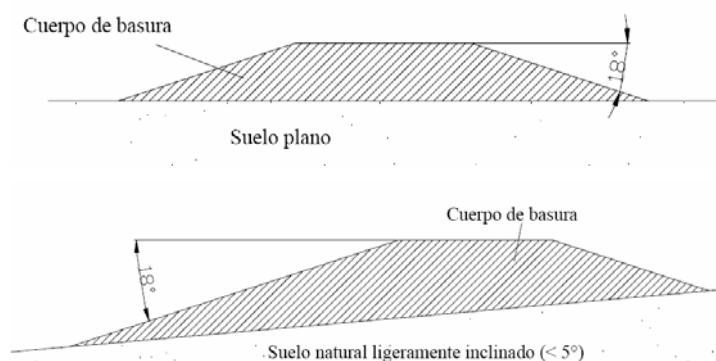


Figura 33. Geometrías de SDF estables.

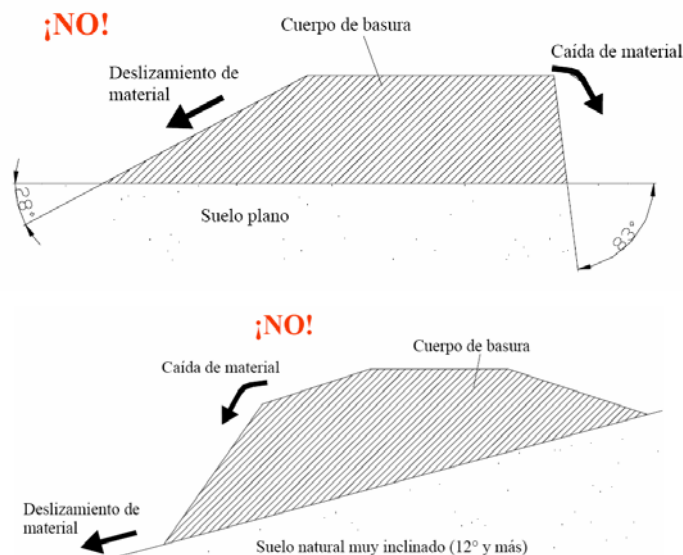


Figura 34. Geometrías de SDF inestables.

Fuente: Diseño, construcción, operación y cierre de SDF Municipales, Eva Gröven, 2002.

Cobertura diaria e intermedia. Con el fin de impedir la dispersión de los materiales ligeros de los residuos y la proliferación de la fauna nociva, se debe cubrir diariamente los residuos. El espesor recomendado es de 15 cm compactados.

Para la cobertura intermedia se recomiendan 30 cm de material compactado. Sobre esta capa no se dispondrán residuos por periodos prolongados, asegurando períodos objetivos de la cobertura diaria por un periodo de tiempo mayor.

La tendencia actual es minimizar la cobertura en la masa de residuos, permitiendo un mejor drenaje de los lixiviados y del biogás en la masa de residuos. La metodología para lograr este fin es ir retirando la cobertura antes dispuesta y reutilizarla, de esta manera los residuos frescos se disponen directamente con los anteriormente dispuestos.

Control de la operación. Se debe llevar un control **diario** del avance del SDF (celdas) y el material utilizado para la cobertura, además de las horas máquina utilizadas en la operación de extensión, compactación y cobertura de los residuos.

Cálculo de celda diaria. La celda diaria esta conformada básicamente por los residuos dispuestos y el material de cobertura y su diseño tiene como finalidad estimar el material de cobertura requerido para su operación y el avance diario.

Las dimensiones y el volumen de la celda dependen de:

- La cantidad de residuos sólidos diaria a disponer;
- El grado de compactación de los residuos;
- La altura estimada de los residuos, dependiendo del tipo de equipo de compactación con que se cuente;
- La dimensión del frente de trabajo que permita recibir los residuos en la hora pico diaria.

Volúmen de residuos a disponer. Primero se debe determinar la cantidad de residuos diarios a disponer mediante la siguiente ecuación.

$$V_c = \frac{RS_d}{D_{rs}}$$

Donde:

V_c : Volumen de celda diaria (m^3 / día)

RS_d : Cantidad diaria de residuos a disponer (kg/día)

D_{RS} : Densidad de los residuos dispuestos compactados (kg/m^3)

Área media de la celda. Dependiendo si el SDF es operado manualmente o con equipo de compactación la altura de la celda puede variar entre 1 a 5 m.

$$A_c = \frac{V_c}{H_c}$$

Donde.

A_c : Área media de la celda (m^2 /día)

H_c : Altura media de la celda (m)

Cálculo del frente de trabajo. Para el cálculo del ancho del frente de trabajo, primero se determinará la cantidad de camiones que pueden ser descargados en una hora de punta de trabajo.

$$N_c = \frac{RS_d \cdot P\%}{H_{pico} / C_{camión}}$$

Donde.

$P\%$: Porcentaje de residuos que se disponen en las horas punta (ejemplo 40%)

H_{pico} : Horas punta en un día de operación del SDF (hrs.)(ejemplo 3 hrs.)

$C_{camión}$: Capacidad media de los camiones recolectores que disponen en el SDF expresado en (Kg/camión)

Sin embargo la cantidad de camiones no podrá ser atendida simultáneamente, por lo cual se deberá calcular el número real de camiones que serán atendidos en el frente de trabajo de la siguiente forma.

$$N_{real} = N_c \frac{t_{descarga}}{t_{60}}$$

Donde:

N_{real} : cantidad real de camiones que son atendidos simultáneamente en el frente de trabajo.

$t_{descarga}$: Tiempo de descarga de un camión, el que puede variar entre 10 a 15 minutos (min.)

t_{60} : Hora punta de descarga, en minutos (60 min.)

Para determinar el frente de trabajo se utilizará la siguiente fórmula.

$$F_t = 3N_{real} + 3$$

Donde.

F_t : largo total del frente de trabajo expreso en (m)

El N_{real} esta multiplicado por 3, considerando que cada camión tiene una holgura de 3 m de ancho del frente para descargar. A esto se le suma 1.5 m (osea 3 m más) adicionales por lado para permitir una descarga holgada de los residuos.

7.10.a7 Perfil de puestos

Personal del SDF: Se debe establecer claramente el perfil requerido, la descripción y función para cada uno de los puestos que comprenderán el organigrama general de operación del SDF. La cantidad de personal necesario irá en función del tamaño de éste.

7.10.a8 Reglamento Interno.

Reglamento interno: instrumento de organización que establece las normas, derechos y obligaciones del personal que trabaja en el SDF.

4.12 Control de registro

7.10. El sitio de disposición final deberá contar con:

7.10.b Un control de registro.

7.10.b1 Ingreso de residuos sólidos urbanos y manejo especial, materiales, vehículos, personal y visitantes.

Control de ingreso: Debe mantenerse un control y registro de toda persona y vehículo que ingresa al SDF. En el caso del personal y visitas, se debe registrar:

- Nombre;
- Identificación personal;
- Motivo de la visita;
- Hora de Ingreso;
- Hora de salida;

En el caso de ingreso de residuos, se debe realizar una inspección visual del tipo de residuos y registrar:

- Placa del vehículo;

- No. Económico;
- Procedencia;
- Peso Bruto;
- Tara;
- Peso Neto;
- Tipo de residuo;
- Hora entrada;
- Hora salida;

Se pueden obtener registros tipos del “Manual para la supervisión y control de SDF” publicado por la SEMAGEM (Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México)

7.10.b2 Secuencia de llenado del sitio de disposición final

Secuencia de llenado: se debe registrar el orden de avance del SDF, con el fin de comparar lo proyectado con lo real y determinar si es necesario tomar medidas operacionales para cumplir adecuadamente con la vida útil del sitio de disposición final.

7.10.b3 Generación y manejo de lixiviados y biogás

Registro de generación y manejo de lixiviado: Se recomienda medir y registrar la generación de lixiviados, indicándose cualquier variación de importancia o contingencia.

Registro de generación y manejo de biogás: Se recomienda medir y registrar la generación de biogás en cada una de las chimeneas en operación e inactivas, indicándose si es que existen grandes variaciones en el flujo de biogás. Asimismo se debe registrar cuales chimeneas se mantiene encendidas, en caso de utilizar este método para la incineración del biogás.

Los datos estadísticos que se recopilen permitirán ajustar los modelos utilizados para la proyección, tanto de lixiviados como de biogás.

7.10.b.4 Contingencias

Contingencias. Se debe registrar todas las contingencias que se generen en el SDF, indicándose además las medidas adoptadas para su control.

7.10.c Informe mensual de actividades.

Informe mensual. Este informe deberá contener:

- Un resumen de la operación del SDF;
- Registro de ingreso de residuos al SDF;
- Monitoreo de biogás y lixiviados;

- Informe de contingencias.

4.13 Programa monitoreo ambiental

7.11 *Para asegurar la adecuada operación de los sitios de disposición final, se deberá instrumentar un programa que incluya la medición y control de los impactos ambientales, además del programa de monitoreo ambiental de dichos sitios y conservar y mantener los registros correspondientes:*

Definiremos Monitoreo Ambiental como el conjunto de acciones para la verificación periódica del cumplimiento de los requerimientos establecidos para evitar la contaminación del ambiente.

A continuación se describen las acciones necesarias para el monitoreo de biogás, lixiviados y acuíferos en el SDF.

Monitoreo de biogás.

7.11.1 Monitoreo de biogás

Se debe elaborar un programa de monitoreo de biogás que tenga como objetivo, conocer el grado de estabilización de los residuos para proteger la integridad del sitio de disposición final y detectar migraciones fuera del predio. Dicho programa debe especificar los parámetros de composición, explosividad y flujo del biogás.

En el programa para el monitoreo del biogás generado en el SDF, se especificarán los parámetros a determinar, equipos y técnicas a emplear, así como la frecuencia de muestreo. Se recomienda que para la composición del biogás (determinación de metano, bióxido de carbono, oxígeno y nitrógeno) se realicen muestreos y análisis trimestrales, mientras que la determinación de niveles de explosividad, toxicidad y flujo de gases se haga diariamente.

Los niveles de explosividad se expresan como LEL (Lower Explosive Limit – límite bajo de explosividad) y UEL (Upper Explosive Limit – límite alto de explosividad). Estos límites expresan, en porcentaje, la concentración necesaria para que el metano al mezclarse con aire se vuelva inflamable o explosivo. El límite inferior es 5% de concentración de metano y el límite superior es 15%.



Figura 35. Rango de explosividad del gas metano.

El monitoreo del biogás se podrá llevar a cabo utilizando equipos especializados de detección de metano y otros compuestos como Monóxido de carbono. Por lo general estos equipos cuentan con alarma cuando la relación entre aire y metano se acerca a los índices de explosividad, indicándolo como porcentaje (1 – 100 %) del LEL.

Monitoreo de lixiviado

7.11.2 Monitoreo de lixiviado

Se debe elaborar un programa de monitoreo del lixiviado, que tenga como objetivo conocer sus características de Potencial de Hidrógeno (pH), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y metales pesados.

La caracterización de los lixiviados, dada la heterogeneidad de los residuos, implica la medición de una gran cantidad de parámetros físicos y químicos, de los cuales, los más comunes se muestran en la siguiente tabla:

Cuadro 18. Parámetros y características de un lixiviado.

PARÁMETROS	INTERVALO (mg/l)
*Ph	5.3-8.5
*DQO	3,000-45,000
*cloruro	100-3,000
*nitratos	1-40
*nitrógeno amoniacal	10-800
*conductividad específica	***
*temperatura	***
*cianuros	100-1,500
*sulfatos	<0.10
VOCs	***
DBO	2,000-30,000
COT	1,500-20,000
Sólidos suspendidos totales	200-1000
Fósforo total	1-70
Ortofosfatos	1-50
Alcalinidad como CaCO ₃	1,000-10,000
Dureza Total	300 -10,000
Calcio	200 - 3,000
Magnesio	50- 1,500
Potasio	200-2,000
Sodio	200-2,000
Hierro total	50-600

VOC's: orgánicos volátiles. * : Parámetros Utilizados Comúnmente. ***: No se reportan valores.
Fuente; Swana, 1991

El muestreo de los diferentes parámetros, está en función del objetivo que se persiga pudiendo ser:

El control ambiental para evaluar las posibles afectaciones al ambiente debido a la fuga de lixiviados, debe dirigir el monitoreo a las zonas de mayor impacto: fuentes de agua subterránea y superficial, teniendo como objetivo determinar la afectación del agua por los lixiviados.

La caracterización fisicoquímica, para los siguientes casos:

- Conocer el grado de estabilización de los residuos;
- Conocer las características del lixiviado y su grado de estabilización;
- Obtener información para definir su tratamiento o método de disposición final;

Para los primeros dos, se debe determinar: el pH, DQO, DBO5, COT, AGV (Ácidos grasos volátiles); mientras que para el tercero, se evaluarán los parámetros en función al tipo de tratamiento a diseñar.

Monitoreo de acuíferos

7.11.3 Monitoreo de acuíferos

Los programas de monitoreo deben contar con puntos de muestreo que respondan a las condiciones particulares del sistema de flujo hidráulico, mismo que define la zona de influencia del sitio de disposición final, y por lo menos, dos pozos de muestreo, uno aguas arriba y otro aguas abajo del sitio de disposición final. Los parámetros básicos que se considerarán en el diseño de los pozos son:

Gradiente superior y descendente hidráulico.

Variaciones naturales del flujo del acuífero.

Variaciones estacionales del flujo del acuífero.

Calidad del agua antes y después del establecimiento del sitio de disposición final. La calidad de referencia estará definida por las características del agua nativa.

La necesidad de este monitoreo está en función a la cercanía a las aguas subterráneas o superficiales. Los parámetros a estudiar son los mismos que los empleados para el monitoreo de los lixiviados.

El monitoreo del acuífero, se realizará sólo en caso de que exista la posibilidad de contaminar el manto acuífero, por su cercanía al nivel del terreno natural, o bien porque el SDF se ubique sobre un acuífero libre.

El monitoreo de agua subterránea deberá realizarse en base al estudio geológico, que defina el Modelo Hidrogeológico de la región, con base al cual se deberá perforar como mínimo dos pozos, uno aguas arriba del SDF y el otro aguas abajo, debiendo probar la conductividad hidráulica de la formación y determinar si responden al flujo hidráulico, todo esto con el fin de obtener datos representativos del monitoreo.

4.14 Recuperación de materiales reciclables en el SDF

7.12 Cualquier actividad de separación de residuos en el sitio de disposición final no deberá afectar el cumplimiento de las especificaciones

de operación contenidas en la presente Norma, ni significar un riesgo para las personas que la realicen

Dado que el objetivo primordial de un SDF de residuos es el de confinarlos convenientemente, evitando que haya afectaciones al ambiente y la salud pública; el hecho de que se considere la posibilidad de realizar actividades para la separación y aprovechamiento de residuos, debe considerarse como un objetivo secundario, por lo que no deberá poner en riesgo la eficiencia del sistema de disposición final que se pretenda aplicar.

En particular, se deberá evitar por todos los medios, que la separación y el aprovechamiento de los residuos impacten cualquier actividad al interior del SDF, pero sobre todo en los frentes de trabajo, ya que con seguridad sería imposible atender las especificaciones que establece la Norma oficial Mexicana NOM-083/SEMARNAT-2003.

Si bien existe la posibilidad de realizar la actividad de recuperación de materiales reciclables en el SDF, ésta debe ejecutarse tomando todas las medidas necesarias para evitar cualquier tipo de accidentes y riesgo sanitario para quienes realicen dicha tarea.

Aunque existen medios mecánicos para desarrollar la separación de materiales, debe tomarse en cuenta que los residuos ya han sido mezclados con otros materiales contaminados, perdiendo de alguna manera parte del valor que tenían en un comienzo al ser inicialmente desechados.

Algunas alternativas de separación en el SDF introducen el uso de correas transportadoras dispuestas en galpones, en donde grupos de trabajadores se dan a tarea de ir separando los materiales considerados de valor. El trabajo realizado en estas circunstancias permite trabajar en condiciones de lluvia, protegiendo los materiales recuperados sin riesgo a que se humedezcan y pierdan su valor residual.

5 Requisitos mínimos que deben cumplir los SDF, tipo D (menos de 10 toneladas diarias)

Este tipo de sitios están pensados para comunidades pequeñas y alejadas de los centros urbanos. Es una opción para disponer los residuos de forma segura y garantizar la protección al medio ambiente sin incrementar los costos de instalación y operación. La evaluación de estos sitios se centra en las restricciones de esta sección y las enunciadas en el capítulo 1. El punto crítico en estos sitios es la impermeabilización que se presenta menos estricta (100 veces) y puede ser fácilmente cumplida con la mayoría de los materiales arcillosos. Para planes de regularización de sitios categoría D se ha diseñado una herramienta adicional la cual se encuentra disponible en www.giresol.org.

5.1 Impermeabilización para SDF tipo D

8.1 Garantizar un coeficiente de conductividad hidráulica de 1×10^{-5} cm/seg, con un espesor mínimo de un metro, o su equivalente, por condiciones naturales del terreno, o bien, mediante la impermeabilización del sitio con barreras naturales o artificiales.

El objetivo de este requerimiento es el de evitar la infiltración de los lixiviados contaminantes que se generan en cualquier SDF, hacia los mantos acuíferos subterráneos, con el fin de proteger la calidad de sus aguas. Es necesario demostrar que se cumple naturalmente con la especificación señalada, con o sin un pre-tratamiento de la base del SDF utilizando materiales naturales (arcilla) o utilizando un sistema de impermeabilización adicional, que sea equivalente a las especificaciones establecidas; empleando para ello, cualquier sistema complementario tal y como son las membranas sintéticas, membranas compuestas con materiales naturales, sellos naturales a base de sales minerales, hasta alguna combinación de éstas. Información con mayor detalle puede encontrarse en el apartado 4.1.

5.2 Compactación de los residuos

8.2 Una compactación mínima de los residuos, de 300 kg/m^3 .

Para este tipo de SDF, por la cantidad tan reducida de residuos a manejar diariamente (menos de 10 toneladas), es más conveniente y económico realizar la compactación con medios manuales. Para obtener mejores resultados, los residuos deben esparcirse y compactarse en capas de no más de 30 cm de espesor. Hay que tomar en cuenta que entre más gruesa sea la capa de residuos, menor será la densidad que se pueda alcanzar. El trabajo de compactación se puede llevar a cabo empleando pisones de mano, rodillos manuales o compactadores manuales vibratorios. En aquellos casos en los que se tenga acceso al empleo de maquinaria pesada, es más viable realizar la compactación en forma horizontal.

5.3 Cobertura de los residuos

8.3 Cobertura de los residuos, por lo menos cada semana.

En ese sentido, la especificación que señala la Norma para los SDF tipo D puede ser considerada relativamente laxa (la cual indica que se realizará por lo menos cada semana); sin embargo, la frecuencia máxima de cobertura, es menor al ciclo de reproducción de la mosca (de 8 a 13 días), con lo que se garantizaría, que los huevecillos depositados por la mosca en los residuos no puedan transformarse en vectores adultos de transmisión de enfermedades al ser destruidos con la cobertura semanal. Este requisito es el más difícil de evaluar ya que depende del trabajo diario, por lo que es recomendable hacer visitas periódicas al sitio una vez instalado, como medida precautoria, lo cual ayudará a prevenir los impactos nocivos a la salud ocasionados por un mal manejo.

5.4 Control de ingreso de residuos peligrosos

8.4 Evitar el ingreso de residuos peligrosos en general.

El SDF deberá contar con un procedimiento específico para garantizar que residuos peligrosos no ingresen a dichas instalaciones, ni en forma accidental ni dolosa. Para este fin, cada embarque de residuos por confinar se deberá respaldar con un manifiesto, el cual deberá ser presentado y revisado previo al ingreso de los residuos al SDF, con el fin de aceptar o rechazar el embarque. En caso de no ser aceptado, se debe establecer un procedimiento de rechazo en coordinación con la autoridad federal para asegurar el destino final adecuado de dichos residuos. Los residuos que no podrán ingresar son mencionados de manera general en el punto 5.9 de esta guía.

5.5 Control de fauna nociva

8.5 Control de fauna nociva y evitar el ingreso de animales.

No hay mejor control para la fauna nociva que la compactación y cobertura diaria de los residuos; ya que un buen sello de los residuos, impide categóricamente el ingreso de roedores e insectos a las celdas de residuos. Esta medida se debe complementar con un buen cierre perimetral del recinto donde opera el SDF, pudiendo utilizar para esto malla ciclónica y alambre de púas. En cualquier caso es preferible utilizar controles biológicos introduciendo depredadores naturales y únicamente en casos extremos, hacer uso de agentes químicos.

5.6 Cerco perimetral

8.6 Cercar en su totalidad el sitio de disposición final.

Un elemento fundamental para cualquier SDF, es contar con una cerca perimetral que no solamente sirva para delimitar el sitio, sino también para evitar el ingreso incontrolado de vehículos, personas y animales a las instalaciones. Para ello se recomienda el uso de malla ciclónica y alambre de púas.

6 Clausura del SDF

La clausura del SDF es el periodo en el cual este cesa su operación y se cubre con un sistema de capas denominada cobertura final. Posterior a esto el SDF se mantiene y controla durante un periodo de tiempo que, según la NOM-083-SEMARNAT-2003 es de 20 años. Este periodo de tiempo se denomina post-clausura y comprende los programas de monitoreo y reinserción del SDF al entorno. El cuidado en la operación de la clausura y posclausura son actividades relevantes en el ciclo de un SDF ya que permite reinsertarlo al medioambiente, minimizando los riesgos para la salud y promoviendo la seguridad pública y del entorno. A continuación se describen los puntos más relevantes a seguir al finalizar la vida útil del SDF.

6.1 Cobertura final del SDF

9.1 Cobertura final de clausura.

La cobertura debe aislar los residuos, minimizar la infiltración de líquidos en las celdas, controlar el flujo del biogás generado, minimizar la erosión y brindar un drenaje adecuado.

Las áreas que alcancen su altura final y tengan una extensión de dos hectáreas deben ser cubiertas conforme al avance de los trabajos y el diseño específico del sitio.

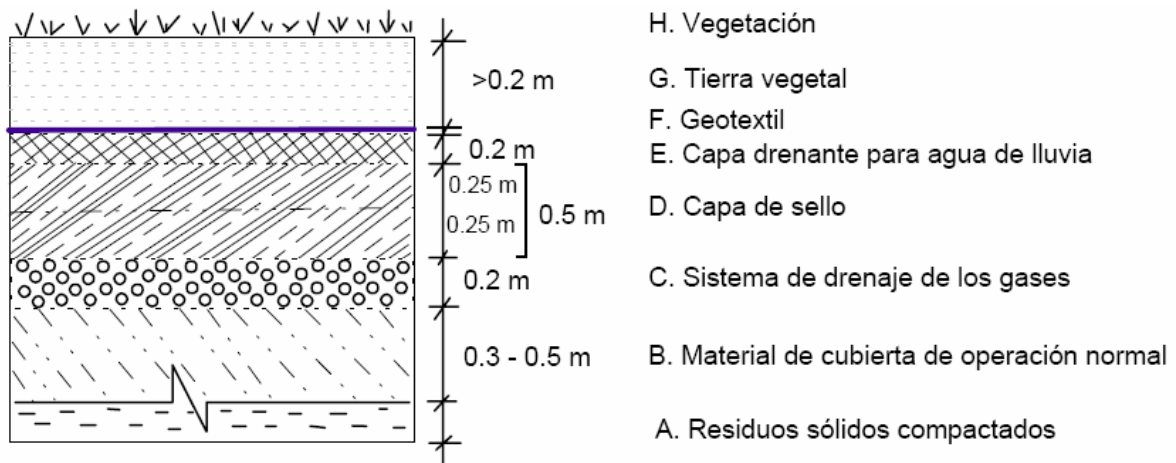


Figura 36. Diseño de cobertura final.

Fuente: Manual para la rehabilitación, clausura y saneamiento de tiraderos a cielo abierto en el Estado de México. SEMAGEM-GTZ, 2002.

El propósito de cubrir los residuos depositados en un SDF, es aislarlos completamente, para minimizar o evitar la infiltración de líquidos a través de los residuos depositados, así como orientar la salida del biogás por las estructuras especiales que se instrumenten en el sitio. La cobertura final tiene como finalidad impedir, con un mínimo de mantenimiento, el ingreso de aguas pluviales a la masa de residuos, evitar la erosión, sustentar una cubierta vegetal y evitar la migración de biogás y lixiviado fuera de ésta mientras finaliza el proceso de estabilización de los

residuos. Un esquema de una cobertura final tipo, en donde se detalla cada una de las capas y su finalidad se muestra en la Figura 36.

6.2 Conformación final del sitio

9.2 Conformación final del sitio.

La conformación final que se debe dar al sitio de disposición final debe contemplar las restricciones relacionadas con el uso del sitio, estabilidad de taludes, límites del predio, características de la cobertura final de clausura, drenajes superficiales y la infraestructura para control del lixiviado y biogás.

Esta especificación tiene como objetivo definir las acciones a realizar para dotar al SDF de una conformación, que además de tener una concepción paisajística acorde con el entorno, permita el control de los escurrimientos pluviales, lixiviados y biogás; además de garantizar la estabilidad física de taludes, plataformas y bermas que se implementarán en el sitio. Al respecto, a continuación se describen las diferentes acciones a realizar para cumplir con la especificación señalada.

Estabilidad de taludes. Se debe garantizar la estabilidad física de los taludes buscando evitar deslizamientos de la masa de residuos mediante la utilización de un ángulo de reposo adecuado.

Estabilización geotécnica. Serán todas las obras de ingeniería necesarias para mantener estable la masa de residuos entre las que se consideran los muros o diques de contención con el fin de evitar deslizamientos. Se debe tomar en cuenta que mientras mayor sea el espesor de la cubierta final, mayor será la sobrecarga que se aplique sobre los residuos, reduciendo el tiempo de estabilización de los asentamientos. Sin embargo se debe realizar un análisis de estabilidad de taludes de toda la geometría de sellado del SDF.

Drenaje y control de lixiviado. Se recomienda colocar en la parte baja del SDF, tuberías perforadas en toda su longitud, preferentemente de polietileno de alta densidad y 6" de diámetro promedio; para captar y conducir los lixiviados que percolen a través de los estratos de residuos. Los criterios y especificaciones para la planeación y el diseño del sistema para el control de lixiviados, serán los mismos que se indicaron en el Capítulo 4 y 5 de la presente guía.

Diseño del sistema para el control de escurrimientos pluviales. El objeto fundamental de los interceptores pluviales es captar y desviar los escurrimientos de agua, impidiendo que lleguen al sitio, por lo que deben ser ubicados en su perímetro y donde se requieran. Estos sistemas se proyectarán para captar una cantidad de agua determinada por el escurrimiento probable del agua de lluvia. Las fórmulas para el cálculo del gasto, requieren del conocimiento de la precipitación pluvial, del área a drenar, de su topografía y del ciclo hidrológico en dicha área. Estas obras de drenaje, se recomienda diseñarlas con capacidad para manejar caudales iguales o mayores al de una tormenta con periodo de retorno de 25 años. Se deberá elaborar un cálculo

para determinar los gastos, pendientes hidráulicas, velocidades máximas y mínimas, así como la dimensión de los ductos.

Diseño del sistema para el control del biogás. Una vez finalizada la operación del SDF, se tomarán las medidas necesarias para asegurar la correcta evacuación del biogás generado por el SDF. Dentro de estas medidas está la instalación de obras para la evacuación e incineración del biogás (si este no se aprovecha de otra manera).

6.3 Mantenimiento posclausura.

9.3 Mantenimiento.

Se debe elaborar y operar un programa de mantenimiento de posclausura para todas las instalaciones del sitio de disposición final, por un periodo de al menos 20 años. Este periodo puede ser reducido cuando se demuestre que ya no existe riesgo para la salud y el ambiente. El programa debe incluir el mantenimiento de la cobertura final de clausura, para reparar grietas y hundimientos provocados por la degradación de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como los daños ocasionados por erosión (escurrimientos pluviales y viento).

Una vez finalizadas las tareas de cierre del SDF, debe entrar en operación el programa de posclausura, el cual tiene como objetivo asegurar la integridad, a largo plazo, del SDF. Los componentes principales de este programa son:

- Mantenimiento de la superficie del SDF y la cubierta vegetal de la cual se dispuso. Esto debe incluir la restauración de las áreas dañadas por la erosión, siembra de especies vegetales consideradas adecuadas, nivelación de las áreas afectadas por los asentamientos de la masa de residuos, mantenimiento de las áreas verdes, etc.;
- Mantenimiento de las obras de drenaje y piscinas de sedimentación;
- Operación y mantenimiento de las instalaciones para el manejo de lixiviados;
- Operación y mantenimiento de las instalaciones para el manejo y extracción del biogás;
- Monitoreo y control de aguas superficiales;
- Monitoreo y control de aguas subterráneas;

6.4 Programa de monitoreo.

9.4 Programa de monitoreo.

Se debe elaborar y operar un programa de monitoreo para detectar condiciones inaceptables de riesgo al ambiente por la emisión de biogás y generación de lixiviado, el cual debe mantenerse vigente por el mismo periodo que en el punto 9.3 de la presente Norma.

El objetivo de este programa es mantener un control constante de las condiciones ambientales del SDF una vez iniciada su clausura, hasta que, en base a lo observado, el SDF alcance su estabilización y no represente un riesgo para la salud pública y el ambiente. El programa de monitoreo debe contener como mínimo el seguimiento a los siguientes elementos:

- Aguas superficiales;
- Aguas subterráneas;
- Generación de lixiviados;
- Generación y migración de biogás;
- Erosión de la cobertura;
- Comportamiento de la cubierta vegetal; y
- Comportamiento y estabilidad de taludes.

El control de las aguas superficiales, si las hay, deberá llevarse a cabo en un mínimo de dos puntos, uno aguas arriba del SDF y otro aguas abajo. El control de gases deberá ser representativo de cada sección del SDF. En aquellos SDF que no se proceda al aprovechamiento energético de los gases, su control se realizará en los puntos de emisión o quema de dichos gases. La frecuencia recomendada para la toma de muestras y análisis se muestra en el Cuadro 19.

Cuadro 19. Frecuencia recomendada para la realización de análisis a lixiviados y biogás.

	Fase de explotación	Fase de mantenimientos posteriores ⁽¹⁾
Volumen de los lixiviados.	Mensualmente ^{(3), (4)}	Cada seis meses.
Composición de los lixiviados ⁽²⁾	Trimestralmente ⁽³⁾	Cada seis meses
Volumen y composición de las aguas superficiales ⁽⁷⁾	Trimestralmente ^{(3), (4)}	Cada seis meses
Emisiones potenciales de gas y presión atmosférica (CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , H ₂ S, H ₂ , etc.) ⁽⁴⁾ .	Mensualmente ^{(3), (5)}	Cada seis meses ⁽⁶⁾

(1) La frecuencia de la toma de muestras podría adaptarse en función de la morfología de los residuos del SDF (en túmulo, enterrado, etc.). (2) Los parámetros que deben medirse y las sustancias que deban analizarse variarán conforme a la composición de los residuos depositados; deberán indicarse en el documento de autorización y reflejar las características del lixiviado de los residuos. (3) Si la evaluación de los datos indica que mayores intervalos son igualmente efectivos, los mismos podrán adaptarse. Para los lixiviados, siempre se deberá medir la conductividad como mínimo una vez al año. (4) Estas mediciones se refieren principalmente al contenido de materia orgánica en el residuo. (5) CH₄ CO₂ O₂ periódicamente; otros gases, según proceda, conforme a la composición de los residuos depositados para reflejar sus propiedades de lixiviabilidad. (6) Deberá comprobarse periódicamente la eficacia del sistema de extracción de gases. (7) Sobre la base de las características del emplazamiento del SDF, las Comunidades Autónomas podrán determinar que dichas mediciones no son necesarias e informarán de ello al Ministerio de Medio Ambiente.

6.5 Uso final del SDF

9.5 Uso final del sitio de disposición final.

Debe ser acorde con el uso de suelo aprobado por la autoridad competente con las restricciones inherentes a la baja capacidad de carga, posibilidad de hundimientos diferenciales y presencia de biogás.

El proyecto final para la reinserción del SDF al entorno, una vez estabilizado y acondicionado, debe contemplar las restricciones de uso del suelo para el cual fue autorizado. Comúnmente los proyectos contemplan la construcción de parques, jardines, áreas deportivas, viveros y otro tipo de proyectos, en los que se considera la baja capacidad de soporte del suelo. Se recomienda contemplar desde el inicio de la operación del SDF la instalación y mantenimiento de una cortina vegetal, que permitirá aislar a mediano plazo la operación del SDF del entorno inmediato, así como contribuir a la minimización de la migración de olores a comunidades cercanas y mejorar el impacto visual al entorno del SDF. Se debe estudiar qué tipo de árboles son los recomendables para la zona y que sean resistentes al ambiente de operación del SDF. Para el aprovechamiento de los SDF clausurados con el fin de habilitarlos como áreas verdes, parques, jardines y en general como un sitio deportivo recreacional, será necesario que el sitio se encuentre estabilizado y que además se cuente con un estudio de riesgo crónico-toxicológico, que garantice la compatibilidad entre el sitio y el uso pretendido, sin riesgo de afectación a la salud pública.

Bibliografía

Braja M. Das (1999). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica.

CEPIS (1999). Guía para el diseño, construcción y operación de SDF manuales.

Comision Nacional del Agua, Mexico (2002). Ley Federal de Derechos en Materia de Agua.

DED, Ecuador (2002). Diseño, construcción, operación y cierre de SDF Municipales.

G. Tchobanoglous – H. Theisen – S. Vigil (1994). Gestión integral de residuos sólidos.

SEDESOL (2004). Modelo Mexicano de biogás, Manual para el usuario.

SEMAGEM (2002). Manual para la supervisión y control de SDF.

SEMAGEM (2002). Manual para la rehabilitación, clausura y saneamiento de tiraderos a cielo abierto en el estado de México.

SEMAGEM (2003). Guía para el desarrollo, presentación y evaluación de proyectos ejecutivos para SDF.

SEMARNAT (2003). Norma Oficial Mexicana 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.

SEMARNAT (2004). Guía de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003

U.S. EPA (1997). Guía para SDF en países en desarrollo

UNAM (2002). Control, aprovechamiento y disposición final de los residuos sólidos municipales

Glosario

Aceites minerales: Compuesto derivado del petróleo. El ingreso de este residuo a un SDF de RSU esta prohibido.

Acueductos: Obras de infraestructura que transportan el agua a grandes distancias con ayuda de sistemas de bombeo y la acción de la gravedad.

Acuífero: Cualquier formación geológica por la que circulan o se almacenan aguas subterráneas.

Aeródromo de servicio al público: Pistas para aterrizaje y despegue de aviones en uso.

Aeropuerto: Pistas pavimentadas para el aterrizaje y despegue de aviones, hangares y edificaciones.

Análisis químicos estequiométricos: Análisis mediante ecuaciones químicas.

Área de emergencia: Lugar preparado para la recepción de residuos sólidos en caso que se produzca una situación de emergencia en el frente de trabajo.

Área Urbana: Comprende toda la población existente. Es el límite de la traza urbana actual definido legalmente.

Área Urbanizable: Es el área en donde se puede construir y representa el área del crecimiento de la población.

Áreas naturales protegidas: Zonas del territorio nacional y aquellas sobre las que la Nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Zonas en que los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del hombre.

Balance hídrico: Implica la suma de todas las cantidades de aguas que entran en el SDF y la sustracción de las cantidades de aguas consumidas en las reacciones químicas, así como la cantidad que sale en forma de vapor de agua.

Biogás: Mezcla gaseosa resultado del proceso de descomposición anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos, constituida principalmente por metano y bióxido de carbono.

Canales: Cuerpos de agua superficiales con caudal continuo todo el año y que han sido modificados para actividades humanas.

Caverna: Cueva muy grande o sistema de cuevas.

Cerco perimetral: Cierre perimetral del SDF que impide el paso de personas y animales.

Cobertura diaria: Cubierta de protección dispuesta al finalizar la actividad diaria de disposición de residuos sólidos.

Cobertura diaria para SDF Tipo D: Cubierta de protección dispuesta al finalizar la actividad semanal de disposición de residuos sólidos.

Cobertura final de clausura. : Revestimiento de material natural, sintético o ambos; que se coloca sobre la superficie del SDF cuando éste ha cumplido su vida útil.

Coeficiente de conductividad hidráulica: valor que representa la mayor o menor facilidad con que el medio (suelo) deja pasar un fluido a través de él, medido en unidad de área por el tiempo.

Compactación: Paso repetido de equipos pesados, manual o mecánico, sobre los residuos, cuya finalidad principal es eliminar los huecos en las celdas.

Cono de abatimiento: Depresión en el nivel freático debida a la proximidad de un pozo.

Planes de Contingencia: Plan de emergencia cuyo objetivo es dar respuesta oportuna, adecuada y coordinación acciones en situaciones de emergencia.

- Control de accesos:** Barrera que acota el ingreso de personas o vehículos al SDF.
- Control de biogás:** Metodología para medir y/o verificar estado de descomposición de los residuos así como controlar índice de explosividad del biogás del SDF.
- Control de fauna nociva:** Metodología para restringir acceso de fauna nociva al interior del SDF.
- Control de ingreso:** Control y registro de toda persona y vehículo que ingresa al SDF.
- Cueva:** Apertura natural en el subsuelo conectada con la superficie, lo suficientemente grande para que acceda una persona a ella. También se les llama grutas.
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅):** Expresa la cantidad de oxígeno necesario para la oxidación bioquímica, de los compuestos orgánicos degradables existentes en un líquido residual.
- Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Expresa la cantidad de oxígeno necesario para la oxidación química de la materia orgánica.
- Descripción estratigráfica (o corte litológico):** Estudio acerca del orden, posición, composición, textura y estructura de las rocas y suelos de un lugar determinado.
- Destino final de SDF:** El proyecto final para la reinserción del SDF al entorno, una vez estabilizado y acondicionado.
- Dirección flujo subterráneo:** Es el sentido en el cual viajan las aguas subterráneas a través de los estratos del subsuelo.
- Dispersión de materiales ligeros:** Residuos sólidos livianos que son desparramados por el viento.
- Estabilidad de Taludes:** Equilibrio de los cortes de terreno o pendiente de la masa de residuos sin que presente riesgo de deslizamiento.
- Estero:** El depósito natural de aguas nacionales delimitado por la cota de la creciente máxima ordinaria.
- Estimación de la generación de biogás:** Proyección de la producción de biogás generada por el SDF.
- Estuarios:** Es la sección de la desembocadura de los ríos en donde el mar se adentra en el cuerpo de agua dulce formando una laguna salobre.
- Estudio de riesgo aviario:** Muestra la dispersión alrededor del SDF de aves relacionadas con riesgos en aeropuertos.
- Fallas:** Discontinuidades geológicas en donde los bloques se han desplazado, formando un plano de la falla.
- Fauna nociva:** Animales grandes o pequeños (aves, perros, ratas, moscas, etc.) que producen riesgo sanitario dentro y fuera del SDF.
- Fracturas:** Deformaciones de las estructuras geológicas que han cedido a las fuerzas y presentan discontinuidades no plásticas, también se les conoce como "juntas"
- Franja de amortiguamiento:** Zona que proporciona una transición entre el SDF y la propiedad adyacente, pudiendo ser un área natural no contaminada o una zona restaurada, hasta alcanzar una apariencia natural.
- Geología:** Estudio sistemático, de los materiales, procesos, ambiente e historia de la tierra.
- Gradiente hidráulico:** Dirección del flujo de agua subterránea debido a cambios en la profundidad del nivel piezométrico.
- Humedal:** Cuerpo de agua poco profundo con metabolismo aerobio principalmente.
- Impermeabilización:** Protección de los mantos acuíferos por contaminación con lixiviado. La protección se puede efectuar por dos métodos: natural y artificial.
- Infiltración pluvial:** Ingreso de la escorrentía superficial a la masa de residuos sólidos del SDF.

Informe mensual: Informe que resume la operación del SDF, registro de ingreso de residuos al SDF, monitoreo de biogás y lixiviado, informe de contingencias.

Lago: Cuerpo de agua permanente todo el año.

Laguna: Cuerpo de agua permanente todo el año ubicado en el litoral.

Litología: Parte de la geología que estudia las rocas; tipo, propiedades físicas y químicas, tamaño de grano y partículas..

Lixiviado: Líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contienen en forma disuelta o en suspensión, sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que pueden dar lugar a la contaminación del suelo y cuerpos de agua, provocando su deterioro y representa un riesgo potencial para la salud humana y demás organismos vivos.

Lodos: Residuo semilíquido principalmente producto del tratamiento de aguas, que contiene microorganismos entre otros elementos.

Manglar: Tipo de sociedades vegetales permanentemente verdes, tropicales, de tronco corto, que se desarrollan en depresiones de las costas marinas en la zona de mareas, pero protegidas del oleaje, en bahías, lagunas o esteros.

Marco geológico regional: Descripción geológica de la zona donde se desarrollará el proyecto, indicando estratigrafía general, características y procedencia de los materiales (aluviales, fluviales, sedimentarios, etc.).

Marismas: Terreno bajo y pantanoso que inundan las aguas del mar por las mareas y sus sobrantes o por el encuentro de aguas de mar con las de los ríos en su desembocadura.

Método de registro: Registro del ingreso y disposición de los residuos.

Monitoreo ambiental: Conjunto de acciones para la verificación periódica del grado de cumplimiento de los requerimientos establecidos para evitar la contaminación del ambiente.

Monitoreo biogás: Conjunto de acciones que buscan medir las características de composición del biogás y el índice de explosividad de éste.

Monitoreo de lixiviado: Tiene como objetivo conocer las características de lixiviado producido por los residuos sólidos depositados y así tomar las medidas para su tratamiento.

Nivel de compactación: Densidad que alcanzan los residuos debido a una presión ejercida sobre estos mediante el uso de equipos mecánicos o manuales.

Pantano: Hondonada en donde se recogen y se detienen las aguas y que presenta un fondo más o menos cenagoso.

Parámetros hidráulicos del agua: Calidad y características del agua, dependiendo del uso que se le desee dar a ésta.

Periodo de retorno: Es una medida de la probabilidad de que un evento de una determinada magnitud sea igualado o excedido por lo menos una vez en un año cualquiera.

Personal del SDF: Recurso humano que opera en el SDF y lleva las tareas de control, operación y mantenimiento de éste.

Planicies aluviales: Las llanuras que están cubiertas por aluvión.

Planimetría y altimetría: Procedimiento para determinar la posición de puntos proyectados en un plano horizontal (planimetría) y vertical (altimetría).

Pozos: Obras de infraestructura que se utilizan para la extracción de agua del subsuelo a través de conductos con sección circular y con la aplicación de energía.

Pozos (o chimeneas) de captación de biogás: Sistema comúnmente utilizado para la captación (o extracción) y control del biogás generado en el SDF. Este puede ser activo o pasivo.

Pozos de monitoreo: Perforación para el monitoreo de aguas subterráneas.

Programa de mantenimiento posclausura: Programa cuyo objetivo es asegurar la integridad del SDF a largo plazo.

Programa de monitoreo de clausura: Programa cuyo objetivo es mantener un control constante de las condiciones ambientales del SDF una vez iniciada su clausura, hasta que alcance su estabilización y no represente un riesgo para la salud pública y el ambiente.

Programas específicos: Programa de seguimiento, principalmente lo que se refiere a biogás, lixiviado y acuíferos.

Registro de generación y manejo de biogás: Control de la generación de biogás y sus variaciones significativas.

Registro de generación y manejo de lixiviado: Control de la generación de lixiviado y sus variaciones significativas.

Reglamento interno: instrumento de organización que establece las normas, derechos y obligaciones del personal que trabaja en el SDF.

Residuos Manejo Especial: Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como RSU, o bien, que son producidos por grandes generadores de RSU.

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

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

Ríos: Cuerpos de agua superficiales con caudal continuo todo el año. También se les conoce como corrientes de agua superficiales.

Secuencia de llenado: Orden de avance del SDF.

Seguridad y contingencias: Planes que tienen como objetivo dar una respuesta oportuna y tomar las medidas necesarias frente a una situación de emergencia.

Sistema de flujo subterráneo: Dirección del flujo subterráneo regional.

Sistema de captación y extracción de lixiviado: Infraestructura y equipos necesarios para la extracción, conducción y tratamiento de los lixiviados contenidos en la masa de residuos del SDF.

Traza urbana: Conjunto de las vialidades de una población. Los límites son difusos en la mayoría de los casos y dependen de la delimitación de los predios, así como del grado de urbanización.

Unidades hidrogeológicas: Parámetros que definen las características hídricas de un subsuelo, como permeabilidad y espesor.

Valle Fluviales: Aquellos terrenos bajos aledaños a las corrientes de agua que se ven afectados por ésta.

Zona de inundación: La información en general se refiere a aquellos terrenos que se inundan regularmente en la época de la crecida sin información sobre el periodo de retorno.

Zonas Arqueológicas: Aquellas que son zonas consideradas bajo esta clasificación por el Instituto Nacional de Antropología e Historia y decretadas en el Diario Oficial de la Federación.

Zonas de Recarga de Acuíferos: Son aquellos terrenos donde el agua accede al acuífero. El agua se puede infiltrar directamente sobre el terreno y acceder a la zona de aireación del acuífero.

Deutsche Gesellschaft für
Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH

Cooperación Técnica Alemana

Oficina de Representación de la GTZ en México
Av. Santa Fe No. 170, Oficina 4-2-28, Col. Lomas de
Santa Fe Del. Álvaro Obregón, 01210, México, D.F.
T +52 55 85 03 99 35
F +52 55 85 03 99 35
E gtz-mexiko@gtz.de
I www.gtz.de

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Bulevar Adolfo Ruiz Cortinez 4209, Jardinez en la
Montaña Del. Tlalplan, 14210, México, D.F.
T +52 55 56 28 07 29
F +52 55 56 28 08 98
I www.semarnat.gob.mx
I www.giresol.org