



Estado Plurinacional de Bolivia

# Ministerio de Medio Ambiente y Agua

Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico



MMAyA  
Ministerio de Medio Ambiente y Agua

Dirección General de Gestión Integral de Residuos Sólidos

# Guía para el Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios



2012



GUÍA PARA EL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, OPERACION Y CIERRE DE RELLENOS SANITARIOS



## PRESENTACIÓN

El crecimiento de la población, la concentración de actividades económicas e industriales, ha propiciado mayor generación de residuos sólidos y mayor demanda en la atención de los servicios de aseo, que en la mayoría de los municipios, ha rebasado la capacidad técnica y operativa para la prestación de éstos, en la calidad que se requiere. Uno de los servicios que se ve seriamente afectado por el crecimiento urbano, es la disposición final de los residuos sólidos. El Diagnóstico de Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia (VAPSB/DGGIRS/2010), señala que del total de municipios, el 90,8% cuenta con botaderos a cielo abierto, el 6,1% con botaderos controlados y el 3,1% con rellenos sanitarios, afectando a cuerpos de agua, suelos y aire y en consecuencia a la salud de la población.

La disposición final de los residuos sólidos es la última etapa del manejo de residuos sólidos y está relacionada con la preservación del ambiente y la población, consecuentemente, se debe tratar y controlar mediante un sistema adecuado que minimice los impactos negativos hacia el entorno ambiental.

Ante este panorama surge la necesidad de enfocar los esfuerzos a la implementación de rellenos sanitarios y al desarrollo de capacidades de los recursos humanos vinculados al sector, de manera que se asegure la adecuada operación, el máximo aprovechamiento del espacio disponible, la minimización de los posibles efectos negativos hacia el ambiente y la salud de la población y la seguridad de los operadores.

El relleno sanitario, es el método empleado para la correcta disposición final de los residuos sólidos, por lo que como toda obra de ingeniería, tiene que ser planeado y diseñado previamente para asegurar su correcta construcción y posterior operación.

Con el objeto de que los gobiernos municipales diseñen, construyan, operen y realicen el cierre técnico de sus rellenos sanitarios, el Ministerio de Medio Ambiente y Agua, a través del Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico y su Dirección General de Gestión Integral de Residuos Sólidos, con el apoyo de la Agencia Catalana de Cooperación al Desarrollo y la Agencia de Residuos de Cataluña, ha elaborado la "**Guía para el Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios**", en el marco de los objetivos del Programa Plurinacional de Gestión Integral de Residuos Sólidos, 2010 – 2015.

La presente guía brinda toda la información básica necesaria para que los técnicos municipales y proyectistas, consideren factores esenciales como los técnicos, ambientales, legales, económicos y sociales que hacen a la disposición final.

En ese marco, esperamos que este documento sirva como instrumento de orientación y facilitación para la elaboración de proyectos en rellenos sanitarios, que contribuirán no solo al desarrollo del sector, sino también a la sostenibilidad del medio ambiente y la Protección de los Derechos de la Madre Tierra.

Lic. José Antonio Zamora Gutiérrez  
**Ministro de Medio Ambiente y Agua**



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
ÍNDICE DE CUADROS .....	xii
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	xiii
1. CAPITULO I: GENERALIDADES .....	3
1.1 Efecto del manejo inadecuado de los residuos sólidos en la salud de la Población.....	3
1.2 Efectos del Manejo Inadecuado de los Residuos Sólidos en el Medio Ambiente.....	3
1.3 Situación del Manejo de los residuos sólidos en Bolivia .....	5
1.4 Responsabilidad del Manejo de Residuos Sólidos .....	7
1.5 Marco Legal .....	7
CAPÍTULO II: MARCO CONCEPTUAL.....	9
2. CAPITULO II: MARCO CONCEPTUAL .....	11
2.1 Definición .....	11
2.2 Tipos de Relleno Sanitario .....	13
2.2.1 Relleno Sanitarios en función a la Técnica de Disposición.....	13
2.2.2 Rellenos Sanitarios en función a los residuos depositados .....	16
3. CAPITULO III: PROCEDIMIENTOS PREVIOS A LA CONSTRUCCIÓN DE UN RELLENO SANITARIO .....	19
3.1 Línea Base de Información y Diagnóstico .....	20
3.1.1 Identificación de los principales actores del sector.....	20
3.1.2 Conclusiones y Recomendaciones .....	21
3.2 Planificación.....	21
3.3 Identificación de sitios alternativos para la implementación de rellenos sanitarios.....	21
3.3.1 Localización de sitios y Factores para Selección .....	22
3.3.2 Área requerida.....	22
3.3.3 Factores a considerar para la evaluación de sitios.....	23
3.3.3.1 Factores Ambientales .....	24
3.3.3.2 Factores Técnicos.....	25
3.3.3.3 Factores Económicos.....	27
3.3.3.4 Factores Sociales.....	28
3.3.3.5 Factores Legales.....	28
3.4 Análisis de Alternativas y Selección de la Alternativa más Conveniente.....	28
3.4.1 Puntaje Máximo del Sistema de Evaluación.....	31
Fuente: .....	31
3.5 Formulación del Proyecto de Relleno Sanitario .....	32
3.5.1 Planos .....	33
4. CAPITULO IV: ESTUDIOS PRELIMINARES AL DISEÑO DE UN RELLENO SANITARIO .....	37
4.1 Cálculos preliminares para el diseño de un relleno sanitario .....	37
4.1.1 Proyección de la población .....	37
4.1.2 Producción Per-cápita y Generación Total de Residuos Sólidos .....	37
4.1.3 Cálculo de área para relleno sanitario.....	38
4.2 Estudio de caracterización de residuos sólidos .....	39
4.3 Residuos aceptables en un relleno sanitario municipal convencional .....	39
4.4 Estudios de Campo y Diseño .....	41
4.4.1 Estudio topográfico .....	41
4.4.2 Estudio Geotécnico.....	45
4.4.2.1 Muestreo de Suelos .....	49
4.4.2.2 Análisis de Suelos.....	49

4.4.2.3	Determinación de la Textura .....	51
4.4.2.4	Localización de Bancos de Préstamo.....	54
4.4.3	Estudio Geológico.....	54
4.4.4	Estudio hidrogeológico.....	54
4.4.4.1	Estudio Geofísico, Sondeo Eléctrico Vertical.....	55
4.4.5	Estudio Hidrológico.....	58
5.	CAPITULO V: DISEÑO DEL RELLENO SANITARIO .....	63
5.1	Métodos de Construcción del Relleno Sanitario .....	63
5.1.1	Método de Trinchera o Zanja.....	63
5.1.2	Método de Área.....	64
5.1.3	Método Combinado .....	65
5.2	Cálculo de capacidad volumétrica de la celda.....	66
5.2.1	Cálculo del volumen por el método de área por la regla del prismoide.....	66
5.3	Diseño de la celda diaria.....	68
5.3.1	Altura.....	70
5.3.2	Ancho.....	70
5.3.3	Talud.....	70
5.3.4	Material de cobertura.....	70
5.3.5	Volumen de la celda .....	71
5.3.6	Volumen total ocupado .....	71
5.3.7	Largo de la celda .....	71
5.3.8	Cálculo de la vida útil del terreno .....	72
5.4	Diseño del sistema de drenaje pluvial .....	73
5.5	Lixiviados, Manejo y Tratamiento .....	77
5.5.1	Formación de lixiviado .....	77
5.5.1.1	Composición y Características de los lixiviados .....	77
5.5.2	Métodos para el cálculo de lixiviados .....	79
5.5.3	Manejo y Tratamiento de Lixiviados.....	84
5.5.3.1	Procesos anaeróbicos.....	85
5.5.3.2	Procesos aeróbicos.....	89
5.5.3.3	Sistemas naturales.....	91
5.5.3.4	Evaporación Natural y Evaporación Térmica.....	92
5.5.3.5	Recirculación .....	93
5.5.3.6	Procesos Fisicoquímicos.....	94
5.5.3.7	Sistemas de Membranas.....	95
5.5.3.8	Niveles de Tratamiento .....	95
5.5.3.9	Comparación de tecnologías para el tratamiento de lixiviados .....	96
5.6	Gases, Manejo y Tratamiento .....	98
5.6.1	Tasa y Volumen de Producción de Gases .....	99
5.6.2	Sistema de Drenaje .....	100
5.6.3	Manejo del Biogás, Drenaje Activo .....	101
5.6.3.1	Sistema de Captación .....	101
5.6.3.2	Sistema de conducción .....	102
5.6.3.3	Sistema de Succión .....	102
	Fuente: Agència de Residus de Catalunya. Cierre técnico del relleno de Serrallarga, Lleida; Catalunya, España .....	103
5.6.3.4	Sistema de Quemado .....	103
5.6.3.5	Sistema de Limpieza.....	104
5.6.3.6	Sistema de Suministro .....	104

5.7	Otros aspectos a diseñar .....	104
6.	CAPITULO VI: CONSTRUCCIÓN DEL RELLENO SANITARIO .....	107
6.1	Preparación del terreno para la construcción y operación de un relleno sanitario.....	107
6.1.1	Limpieza del área del relleno sanitario .....	107
6.1.2	Nivelación.....	107
6.1.3	Cortes, Préstamos y conformación de taludes .....	107
6.2	Criterios generales para la construcción de celdas.....	109
6.3	Construcción de la Capa Base Impermeable del Relleno Sanitario .....	110
6.3.1	Barrea Geológica en Rellenos Sanitarios Manuales .....	111
6.3.2	Capa Base de Arcilla .....	111
6.4	Uso de Geosintéticos .....	113
6.4.1	Capa Base de Geomembrana .....	115
6.4.1.1	Pasos para Instalar Geomembranas .....	115
6.4.1.2	Espesor de geomembranas .....	118
6.4.1.3	Geotextil.....	118
6.4.2	Drenaje Secundario .....	118
6.5	Seguridad y Estabilidad del Relleno Sanitario compactado con Maquinaria .....	121
6.6	Sistema de colección de Lixiviados .....	122
6.6.1	Sistema de captación de Lixiviados .....	123
6.6.1.1	Drenaje de Grava.....	126
6.6.2	Filtros captadores de lixiviados .....	126
6.6.3	Sistema externo de captación y conducción de lixiviados a tratamiento .....	127
6.6.4	Piscinas de almacenamiento.....	128
6.7	Sistema de Drenaje Pasivo para Gases del Relleno Sanitario.....	128
6.7.1	Construcción de Chimeneas para un Relleno Sanitario Manual .....	128
6.7.2	Construcción de las Chimeneas Relleno Sanitario Mecanizado .....	129
6.7.3	Quema de los gases producidos en el relleno sanitario .....	130
6.8	Obras Complementarias .....	132
6.8.1	Cartel de información y Señalización .....	132
6.8.2	Cerca perimetral y cerco vivo de árboles .....	132
6.8.3	Puerta y Caseta de vigilancia.....	133
6.8.4	Caseta de pesaje.....	133
6.8.5	Báscula de Pesaje .....	134
6.8.6	Área administrativa .....	136
6.8.7	Área de para servicios de primeros auxilios .....	136
6.8.8	Instalaciones sanitarias y eléctricas .....	136
6.8.9	Almacén .....	136
6.8.10	Área de Mantenimiento.....	137
6.8.11	Área de amortiguamiento.....	137
6.8.12	Caminos internos.....	137
6.8.13	Canales de agua para escorrentía .....	137
6.8.14	Playa de Descargue.....	138
7.	CAPITULO VII: OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL RELLENO SANITARIO .....	142
7.1	Recursos Técnicos y Humanos.....	142
7.1.1	Requerimiento de Herramientas .....	143
7.1.2	Seguridad e Higiene Ocupacional.....	144
7.1.2.1	Riesgos.....	144
7.1.2.2	Plan de Contingencias .....	145

7.1.2.3	Plan de Seguridad y Salud Ocupacional .....	145
7.1.2.4	Capacitación .....	146
7.1.2.5	Equipos de protección personal .....	146
7.2	Plan de Operación .....	146
7.2.1	Planificación de orden en construcción de celdas .....	146
7.2.2	Ingreso de los Residuos Sólidos y Registro .....	147
7.2.3	Descarga, compactación y cubierta de residuos sólidos .....	147
7.2.3.1	Para Rellenos Manuales .....	147
7.2.3.2	Para Rellenos Mecanizados.....	150
7.2.4	Conclusión de una celda o módulo de trabajo.....	152
7.3	Compactación de los residuos .....	154
7.3.1	Peso volumétrico .....	155
7.3.2	Factores de compactación.....	155
7.4	Selección del Equipo y Vehículos requeridos para la Operación del Relleno Sanitario.....	157
7.4.1	Buldozer o Tractor Oruga.....	158
7.4.2	Compactador con Ruedas Metálicas.....	160
7.4.3	Cargador de Ruedas.....	161
7.4.4	Cargador de Orugas .....	162
7.4.5	Excavador de Orugas .....	162
7.4.6	Minicargador .....	163
7.4.7	Retroexcavador .....	163
7.4.8	Volquete .....	164
7.5	Cálculos de rendimiento.....	164
7.5.1	Rendimiento de Bulldozer o Tractor .....	164
7.5.2	Rendimiento de Retroexcavador y Pala Cargadora .....	165
7.5.3	Rendimiento del Volquete.....	166
8.	CAPITULO VIII: MONITOREO .....	169
8.1	Monitoreo Ambiental .....	169
8.1.1	Monitoreo para control de aguas subterráneas y superficiales.....	169
8.1.1.1	Etapas de trabajo en el diseño y monitoreo de aguas subterráneas.....	169
8.1.2	Monitoreo del sistema de captación de lixiviados.....	173
8.1.3	Monitoreo del Tratamiento de Gases .....	174
8.1.4	Controles durante la operación de las celdas.....	174
8.1.5	Control de Fuego .....	175
8.1.6	Control de plagas.....	176
9.	CAPITULO IX: CIERRE DEL RELLENO SANITARIO.....	179
9.1	Diseño de la capa final .....	179
9.2	Mantenimiento de las Obras de Cierre Técnico del Botadero .....	182
9.2.1	Mantenimiento de las Vías de Circulación.....	182
9.2.2	Mantenimiento de la Cobertura Final .....	182
9.2.3	Mantenimiento de la cobertura vegetal en la celda .....	183
9.2.4	Mantenimiento de áreas verdes .....	183
9.2.5	Mantenimiento del sistema de drenaje de aguas superficiales.....	183
9.2.6	Asentamiento en celdas.....	183
9.2.7	Adecuación y mantenimiento de taludes y banquinas.....	184
9.2.8	Mantenimiento del sistema de captación de lixiviados .....	184
9.2.9	Mantenimiento de piscinas de almacenamiento de lixiviados .....	184
9.2.10	Mantenimiento del sistema de captación de biogás .....	184

9.3	Reforestación de las celdas antiguas y estabilizadas .....	185
9.3.1	Barreras Rompe Vientos.....	185
9.3.2	Plantación de especies forestales.....	186
9.3.3	Época de plantación .....	188
9.3.4	Técnicas de plantación .....	188
9.4	Actividades de monitoreo ambiental Post – Cierre Técnico .....	188
9.5	Programa de control y monitoreo ambiental .....	189
9.6	Monitoreo de lixiviados, gases, contaminación de aguas subterráneas, superficiales .....	189
9.6.1	Monitoreo de Biogás.....	190
9.6.2	Monitoreo del Aire.....	190
9.6.3	Monitoreo del suelo .....	191
9.7	Uso final del sitio.....	191
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.....		192
ANEXO 1.....		195

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1: CONTAMINACIÓN DE FUENTES CON RESIDUOS SÓLIDOS .....	4
FIGURA 1.4: GENERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS POR DEPARTAMENTO .....	5
FIGURA 1.5: COMPOSICIÓN MEDIA DE RESIDUOS SÓLIDOS EN BOLIVIA .....	5
FIGURA 1.6: PORCENTAJE DE RECOLECCIÓN MEDIA POR FUENTE.....	6
FIGURA 1.7: GESTIÓN ACTUAL DE RESIDUOS SÓLIDOS EN BOLIVIA, ENFOQUE GENERAL .....	6
FIGURA 1.8: DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS EN BOLIVIA.....	7
FIGURA 2.1: COMPONENTES DEL RELLENO SANITARIO .....	12
FIGURA 2.2: ESQUEMA GENERAL DE LOS RELLENOS SANITARIOS .....	13
FIGURA 2.3: ESQUEMA DE UN RELLENO SANITARIO MANUAL.....	15
FIGURA 2.4: ESQUEMA DE UN RELLENO SANITARIO SEMI MECANIZADO O MECANIZADO .....	15
FIGURA 3.1: FLUJOGRAMA DE PROCEDIMIENTOS.....	19
FIGURA 3.2: ESQUEMA DEL NIVEL FREÁTICO .....	27
FIGURA 4.1: ESQUEMA DE CURVAS DE NIVEL .....	43
FIGURA 4.2: DIAGRAMA TRIANGULAR PARA LA CLASIFICACIÓN DE SUELOS POR TEXTURAS.....	46
FIGURA 4.3: INFLUENCIA DE LA TEXTURA SOBRE LA PLASTICIDAD DEL SUELO .....	47
FIGURA 4.4: EL CICLO GEOLÓGICO .....	47
FIGURA 4.5: PERFILES DEL SUELO .....	48
FIGURA 4.6: PREPARACIÓN DE LA MUESTRA .....	52
FIGURA 4.7: PREPARACIÓN DEL SUELO PARA UN ENSAYO DE TEXTURA .....	53
FIGURA 4.8: DISPOSITIVO DE SCHLUMBERGER .....	55
FIGURA 4.9: CICLO HIDROLÓGICO DEL AGUA.....	58
FIGURA 5.1: ESQUEMA DE UNA ZANJA .....	63
FIGURA 5.2: ESQUEMA DE UNA ZANJA EN UN RELLENO SANITARIO MECANIZADO .....	64
FIGURA 5.3: MÉTODO DE ÁREA, RELLENO SANITARIO MECANIZADO.....	65
FIGURA 5.4: MÉTODO DE ÁREA, RELLENO SANITARIO MANUAL.....	65
FIGURA 5.5: MÉTODO COMBINADO, RELLENO SANITARIO MECANIZADO.....	66
FIGURA 5.6: FORMAS GENERALES DEL PRISMOIDE .....	66
FIGURA 5.7: FRENTE DE TRABAJO.....	69
FIGURA 5.8: ELEMENTOS DE UNA CELDA .....	69
FIGURA 5.9: SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA ZANJA.....	76
FIGURA 5.10: FORMACIÓN DE LIXIVIADOS EN UN SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL .....	77
FIGURA 5.11: CALIDAD DE LOS LIXIVIADOS .....	79
FIGURA 5.12: ESQUEMA DEL MODELO CONCEPTUAL GENERAL DE BALANCE HÍDRICO EN .....	80
FIGURA 5.13: LAGUNA ANAEROBIA FACULTATIVA.....	86
FIGURA 5.14: REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE.....	87
FIGURA 5.15: LODOS ACTIVADOS .....	91
FIGURA 5.16: LAGUNA DE ESTABILIZACIÓN .....	92
FIGURA 5.17: EVAPORADOR TÉRMICO DE LIXIVIADOS .....	94
FIGURA 5.18: RECIRCULACIÓN DE LIXIVIADOS.....	94
FIGURA 5.19: ESQUEMA DE TRATAMIENTO USUAL DE LIXIVIADOS .....	96
FIGURA 5.20: COMPOSICIÓN ÓPTIMA EN UNA CELDA DE RELLENO SANITARIO .....	98
FIGURA 5.21: SISTEMA DE CAPTACIÓN DE BIOGÁS POR MEDIO DE POZOS VERTICALES.....	102
FIGURA 5.22: EJEMPLO DE POZO DE CAPTACIÓN PROFUNDO Y COMBUSTIÓN CONJUNTA .....	103
FIGURA 5.23: QUEMADOR ABIERTO .....	103
FIGURA 5.24: SEPARADOR DE HUMEDAD .....	104
FIGURA 6.1: PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA DIARIA .....	110
FIGURA 6.2: CONSTRUCCIÓN DE LA CAPA BASE CON BARRERA NATURAL EN RELLENO SANITARIO MANUAL.....	111
FIGURA 6.3: SISTEMAS DE REVESTIMIENTO DE GEOSINTÉTICOS EN UN RELLENO SANITARIO.....	114
FIGURA 6.4: FORMA ADECUADA PARA SOLDADURA DE GEOMEMBRA .....	116
FIGURA 6.5: IMPERMEABILIZACIÓN DE LA BASE DEL RELLENO SANITARIO .....	119
FIGURA 6.6: CONSTRUCCIÓN DE LA CAPA BASE CUANDO NO HAY BARRERA NATURAL .....	119

FIGURA 6.7: CASOS DE INESTABILIDAD DEL SUELO Y DE LA CELDA DE RESIDUOS SÓLIDOS .....	121
FIGURA 6.8: RELLENO SANITARIO CONSTRUIDO EN TERRAZAS SOBRE UN TERRENO INCLINADO .....	122
FIGURA 6.9: SISTEMA DE DRENAJE INTERNO PARA LIXIVIADOS .....	123
FIGURA 6.10: SISTEMA DE DRENAJE INTERNO PARA LIXIVIADOS CON TUBERÍA DE PVC .....	124
FIGURA 6.11: DETALLE DE UNA TUBERÍA PARA COLECCIÓN DE LIXIVIADO .....	125
FIGURA 6.12: DIAGRAMA DEL DISEÑO DE TERRAZAS EN PENDIENTE .....	125
FIGURA 6.13: CONSTRUCCIÓN DE DRENAJE INTERNO PARA LIXIVIADOS CON GRAVA .....	126
FIGURA 6.14: FILTROS PARA RELLENOS SANITARIOS CON ALTURA SUPERIORES A 15 M .....	127
FIGURA 6.15: FILTROS CAPTADORES DE LIXIVIADOS .....	127
FIGURA 6.16: EMPALME DE FILTRO A TUBERÍA .....	127
FIGURA 6.17: CAPTACIÓN Y CONDUCCIÓN ADECUADA DE LIXIVIADOS .....	128
FIGURA 6.18: DETALLES DEL SISTEMA DEL DREN PARA GAS DE RELLENO SANITARIO .....	129
FIGURA 6.19: COLOCACIÓN DE TUBO PERFORADO .....	131
FIGURA 6.20: CERCA TÍPICA Y CORTINA ARBÓREA DEL RELLENO SANITARIO .....	133
FIGURA 6.21: CASETA DE PESAJE .....	134
FIGURA 6.22: BALANZA DE BAJO PERFIL .....	135
FIGURA 6.23: BALANZA INSTALADA EN MINI FOSA .....	136
FIGURA 7.1: ROPA DE TRABAJO .....	146
FIGURA 7.2: PLANIFICACIÓN DE LOS MÓDULOS DEL RELLENO SANITARIO .....	147
FIGURA 7.3: OPERACIÓN EN RELLENOS MANUALES .....	148
FIGURA 7.4: FORMA DE TRABAJO PARA RELLENO SANITARIO MANUAL MÉTODO DE TRINCHERA .....	149
FIGURA 7.5: FORMA DE TRABAJO PARA RELLENO SANITARIO MANUAL MÉTODO DE ÁREA .....	150
FIGURA 7.6: FORMA DE TRABAJO PARA RELLENOS MECANIZADOS EN LA CELDA DIARIA .....	151
FIGURA 7.7: CIERRE DE MÓDULO DE TRABAJO EN RELLENO MANUAL .....	153
FIGURA 7.8: CURVA DE DENSIDAD DE LA CAPA .....	155
FIGURA 7.9: CURVA DE DENSIDAD DE LA CAPA .....	156
FIGURA 7.10: CURVA DEL NÚMERO DE PASADAS .....	156
FIGURA 7.11: BULDÓZER O TRACTOR DE ORUGAS CON HOJA TOPADORA .....	158
FIGURA 7.12: CARGADOR DE RUEDAS .....	161
FIGURA 7.13: EXCAVADOR DE ORUGAS .....	163
FIGURA 7.14: RETROEXCAVADOR .....	164
FIGURA 7.15: CAMIÓN VOLQUETE .....	164
FIGURA 8.1: INSTALACIÓN DE PIEZÓMETROS O POZOS DE MONITOREO .....	172
FIGURA 9.1: CAPAS DE LA COBERTURA FINAL .....	182
FIGURA 9.2: CAPAS DE LA COBERTURA FINAL EXCAVACIÓN DE HOYOS .....	186
FIGURA 9.3: CUANTIFICACIÓN DE ESPECIES A PLANTARSE EN EL PERÍMETRO DEL RELLENO SANITARIO .....	187
FIGURA 9.4: DISTANCIAS DE PLANTACIÓN DE ESPECIES .....	187
FIGURA 9.5: CORTINA ARBÓREA O BARRERA VEGETAL PARA EL RELLENO SANITARIO .....	188

## ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 2.1: CARACTERÍSTICAS Y TIPOS DE RELLENOS SANITARIOS.....	14
CUADRO 3.1: ÁREA TOTAL REFERENCIAL REQUERIDA PARA RELLENO SANITARIO POR POBLACIÓN Y GENERACIÓN TOTAL.....	23
CUADRO 3.2: ANÁLISIS DE FACTORES Y PARÁMETROS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE SITIOS .....	29
CUADRO 3.3: EVALUACIÓN DEL TERRENO .....	31
CUADRO 4.1: ÍNDICE DE PPC DOMICILIARIO NACIONAL, POR CATEGORÍA POBLACIONAL .....	38
CUADRO 4.2: CÁLCULO DE ÁREA PARA DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES .....	38
CUADRO 4.3: TIPO DE RESIDUOS QUE SE PUEDEN DISPONER EN UN RELLENO SANITARIO MUNICIPAL .....	40
CUADRO 4.4: REPORTE DE DATOS TÉCNICOS.....	45
CUADRO 4.5: COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD K (CM./S)(ESCALA LOGARÍTMICA) .....	50
CUADRO 4.6: TIPOS DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES.....	55
CUADRO 4.7: NÚMERO DE SONDEOS POR ÁREA .....	56
CUADRO 5.1: VELOCIDADES PROMEDIO DEL AGUA EN ZANJAS POR TIPO DE MATERIAL .....	74
CUADRO 5.2: VALORES EMPÍRICOS PARA OBTENER EL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO (K).....	74
CUADRO 5.3: VALORES DE COEFICIENTE DE RETRASO.....	75
CUADRO 5.4: TALUDES TÍPICOS PARA ZANJAS NO REVESTIDAS .....	76
CUADRO 5.5: VELOCIDADES DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD (N).....	76
CUADRO 5.6: VARIACIÓN DE LOS LIXIVIADOS CON LA EDAD DEL VERTIDO .....	78
CUADRO 5.7: ESCORRENTÍA PARA DIFERENTES MATERIALES DE COBERTURA Y DIFERENTES TIPOS DE VEGETACIÓN .....	81
CUADRO 5.8: CÁLCULO DE LA GENERACIÓN DE LIXIVIADO POR LA HUMEDAD PROPIA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS .....	84
CUADRO 5.9: TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS POR TIPO DE RELLENOS SANITARIOS.....	85
CUADRO 5.10: COMPARACIÓN ENTRE TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS .....	96
CUADRO 5.11: COMPARACIÓN ENTRE TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS (RENDIMIENTO DE REMOCIÓN) .....	97
CUADRO 5.12: RANGO DE COMPOSICIÓN DE BIOGÁS GENERADOS EN RELLENOS SANITARIOS.....	99
CUADRO 5.13: PODER CALORÍFICO DE ALGUNOS GASES .....	100
CUADRO 6.1: PARÁMETROS IMPORTANTES PARA LA CAPA MINERAL DE BASE .....	111
CUADRO 6.2: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA GEOMEMBRANA.....	118
CUADRO 7.1: NÚMERO APROXIMADO DE PERSONAL NECESARIO PARA UN RELLENO SANITARIO.....	142
CUADRO 7.2: RENDIMIENTO DE LOS OBREROS EN RELLENO SANITARIO MANUAL .....	143
CUADRO 7.3: HERRAMIENTAS MÍNIMAS REQUERIDAS PARA EL RELLENO SANITARIO MANUAL.....	143
CUADRO 7.4: VARIACIÓN DE PESOS VOLUMÉTRICOS.....	155
CUADRO 7.5: SELECCIÓN DE EQUIPOS SEGÚN EL TONELAJE DIARIO DE RESIDUOS .....	158
CUADRO 7.6: DISTANCIA DE RECORRIDO PROMEDIO DE EQUIPOS PESADO .....	158
CUADRO 7.7: DESCARGA DE PRESIÓN A LOS RESIDUOS.....	159
CUADRO 7.8: RENDIMIENTO DE BULLDOZER TRACTORES DE CADENAS .....	159
CUADRO 7.9: DESCARGA DE PRESIÓN A LOS RESIDUOS.....	160
CUADRO 7.10: DESCARGA DE PRESIÓN A LOS RESIDUOS.....	161
CUADRO 7.11: CARACTERÍSTICAS DE LOS CARGADORES DE ORUGAS .....	162
CUADRO 7.12: CARACTERÍSTICAS DE LA EXCAVADORA DE ORUGAS .....	163
CUADRO 7.13: CLASES DE TERRENOS.....	165
CUADRO 8.1: FORMATO DE REGISTRO PARA EL INVENTARIO DE POZOS NORIA .....	170
CUADRO 8.2: PARÁMETROS A MONITOREAR EN AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS .....	174
CUADRO 9.1: CAPAS NECESARIAS PARA LA CUBIERTA FINAL.....	180
CUADRO 9.2: PARÁMETROS A MONITOREAR EN LA ETAPA DE POST CLAUSURA DE UN RELLENO SANITARIO .....	189
CUADRO 9.3: PARÁMETROS DE MUESTREO DE LOS LIXIVIADOS .....	190
CUADRO 9.4: MONITOREO DE BIOGÁS.....	190
CUADRO 9.5: MONITOREO DEL AIRE .....	191
CUADRO 9.6: MONITOREO DEL SUELO .....	191

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

### A.

**Aguas de escorrentía.** Aguas que no penetran en el suelo o que lo hacen lentamente y que corren sobre la superficie del terreno después de la lluvia.

**Aerobio.** Relativo a la vida o a procesos que pueden ocurrir únicamente en presencia de oxígeno.

**Ambiente.** Conjunto de elementos naturales o inducidos por el hombre que interactúan en un espacio y tiempo determinados.

**Anaerobio.** Relativo a la ausencia de oxígeno libre. Requerimiento de ausencia de aire o de oxígeno para la degradación de la materia orgánica.

**Aprovechamiento de residuos sólidos.** Es el conjunto de medidas que tienen por objeto la valorización o la reincorporación al ciclo productivo de los diferentes recursos presentes en los mismos, mediante reutilización, reciclaje, tratamiento biológico o generación de energía

**Aseo urbano.** Es el servicio público municipal consistente en almacenamiento, barrido y limpieza, recolección, transporte, transferencia, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos municipales.

### B.

**Residuos sólidos.** Todo residuo sólido o semisólido —con excepción de excretas de origen humano o animal— que carece de valor para el que la genera o para su inmediato poseedor. Están comprendidos en la misma definición los desechos, cenizas, elementos de barrido de calles, residuos industriales, de hospitales y de mercados, entre otros. Es sinónimo de desechos o residuos sólidos.

**Berma.** Espacio entre el pie del talud y el declive exterior del terraplén.

**Biodegradable.** Dicho de la materia orgánica, cualidad de ser metabolizada por medios biológicos.

**Biogás.** Mezcla de gases de bajo peso molecular (metano, bióxido de carbono, etc.), producto de la descomposición anaerobia de la materia orgánica.

**Botadero.** Lugar de disposición final de residuos sólidos que no cumple con normas técnicas, ni disposiciones ambientales vigentes o crea riesgos para la salud y seguridad humana o para el ambiente general.

### C.

**Celda.** Conformación geométrica que se les da a los residuos sólidos y al material de cubierta debidamente compactado mediante equipo mecánico o por los trabajadores de un relleno sanitario.

**Compactación.** Acción de presionar cualquier material para reducir los vacíos existentes en él. El propósito de la compactación en el relleno sanitario es disminuir el volumen que ocuparán los residuos sólidos a fin de lograr una mayor estabilidad y vida útil.

**Caseta.** Construcción ubicada en la entrada principal del relleno sanitario que sirve como portería y como sitio para guardar las herramientas y las instalaciones sanitarias.

**Cierre de botaderos (relleno sanitario).** Sellado de un relleno sanitario por haber concluido su vida útil cumpliendo las condiciones establecidas en la normativa correspondiente.

**Clausura de botaderos.** Cierre definitivo de un sitio de disposición final que no cumple lo establecido en la normativa ambiental vigente.

**Control.** Vigilancia y aplicación de las medidas necesarias para el cumplimiento de las disposiciones establecidas.

**Corte.** Acción de rebajar por medios mecánicos o manuales un material; en este caso, el terreno donde se construirá el relleno sanitario.

**Cota.** Marca que indica la elevación de un banco de nivel del terreno.

### D.

**Degradable.** Dicho de determinadas sustancias o compuestos, cualidad de descomponerse gradualmente mediante medios físicos, químicos o biológicos.

**Densidad.** Masa o cantidad de materia de un determinado RSM contenida en una unidad de volumen.

**Diseño.** Trazo o delineación de una obra o figura. Se aplica el término al proyecto básico de la obra.

**Disposición Final.** Acción de depositar permanentemente residuos sólidos en una infraestructura adecuada y autorizada.

**Dren.** Estructura que sirve para el saneamiento y la eliminación del exceso de humedad en los suelos.

**I.**

**Impacto ambiental.** Modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza.

**G.**

**Generador.** Cualquier persona que como resultado de sus actividades de consumo o producción libera residuos sólidos al ambiente.

**Gestión integral de residuos sólidos.** Conjunto articulado de componentes normativos, de planificación, institucionales, de financiamiento, operativos, educativos, de participación ciudadana, investigación y desarrollo, salud, medio ambiente, control y evaluación, implementadas por los actores institucionales y la sociedad, en el marco de políticas y estrategias para la prevención, aprovechamiento, tratamiento y disposición final sanitaria y ambientalmente segura de los residuos sólidos, en los ámbitos nacional, departamental y municipal.

**L.**

**Lixiviado o percolado.** Líquido producido fundamentalmente por la precipitación pluvial que se infiltra a través del material de cobertura y atraviesa las capas de residuos sólidos, transportando concentraciones apreciables de materia orgánica en descomposición y otros contaminantes. Otros factores que contribuyen a la generación de lixiviado son el contenido de humedad propio de los desechos, el agua de la descomposición y la infiltración de aguas subterráneas.

**M.**

**Manejo de residuos sólidos.** Componente operativo de la gestión integral de residuos sólidos que consiste en la realización de las etapas de acondicionamiento y clasificación, almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de residuos sólidos.

**Material de cobertura.** Capa superficial de tierra en cada celda que tiene como finalidad aislar los residuos del ambiente externo, controlar infiltraciones y la presencia de fauna nociva.

**Medida de Mitigación.** Implementación o aplicación de cualquier política, estrategia, obra o acción, tendiente a eliminar o minimizar los impactos adversos que pueden presentarse durante las diversas etapas de desarrollo de un proyecto.

**Migración de biogás.** Movimiento de las partículas de biogás a través y fuera del relleno sanitario.

**Monitoreo Ambiental.** Sistema de seguimiento continuo, de la calidad ambiental a través de la observación, medidas y evaluaciones de una o más de las condiciones ambientales con propósitos definidos.

**N.**

**Nivel freático.** Profundidad a la que se encuentran las aguas freáticas. Este nivel baja en tiempo de estiaje y sube en etapa de lluvias.

**Normas Técnicas.** Son aquellas que se emiten por consenso y son aprobadas por un organismo reconocido en el marco del Sistema Boliviano de Normalización, Metrología, Acreditación y Certificación.

**P.**

**Planimetría.** Es la parte del estudio topográfico que determina la ubicación de los límites del predio, describiendo geoméricamente en un plano, cualquier elemento de significancia, como cursos o cuerpos de agua superficial, áreas de inundación, caminos, líneas de conducción existentes (luz, agua, drenaje, gas, teléfono y árboles), así como todo tipo de estructuras y construcciones dentro del predio.

**Pendiente.** Inclinação que tiene un terreno o cualquier elemento tomando como base la relación entre la longitud horizontal y la vertical.

**Permeabilidad.** Es la capacidad del suelo para conducir o transportar un fluido cuando se encuentra bajo un gradiente. Varía según la densidad del suelo, el grado de saturación y el tamaño de las partículas.

**Pozo de monitoreo.** Perforación profunda que se hace en un relleno sanitario para medir la cantidad de biogás y la calidad de los lixiviados que ahí se generan.

**Precipitación pluvial.** Agua atmosférica que cae al suelo en estado líquido o sólido (lluvia, nieve o granizo).

**Prevención.** Conjunto de disposiciones y medidas anticipadas para evitar el deterioro de un elemento.

## R.

**Reciclaje.** Proceso de valorización que sufre un material o producto para ser reincorporado a un ciclo de producción o de consumo que consiste en transformar los residuos en materia prima secundaria para que ésta pueda ser usada en el proceso de fabricación del mismo producto o de otro. Incluye la transformación del material orgánico, pero no el aprovechamiento energético ni la transformación en materiales que se vayan a usar como combustibles o para operaciones de relleno.

**Recolección.** Operación consistente en recoger los residuos generados y transportarlos a las instalaciones de almacenamiento, transferencia, tratamiento, aprovechamiento y/o a un sitio de disposición final.

**Reducción.** Conjunto de acciones encaminadas a reutilizar, reparar o compostar los residuos dependiendo su naturaleza en la fuente de generación, de manera que estos no sean entregados al operador del servicio de aseo y por tanto disminuya la cantidad de residuos a disponer en rellenos sanitarios.

**Recuperación.** Actividad relacionada con la obtención de materiales secundarios, bien sea por separación, desempaquetamiento, recolección o cualquier otra forma de selección de los residuos sólidos con el objeto de reciclarlos o volverlos a utilizar.

**Relleno sanitario.** Obra de ingeniería para la disposición final segura de residuos sólidos en sitios adecuados y bajo condiciones controladas para evitar daños al ambiente y la salud.

**Residuos sólidos.** Materiales generados en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control, reparación o tratamiento, cuya calidad no permite usarlos nuevamente en el proceso que los generó y que pueden ser objeto de tratamiento y disposición final.

**Residuos sólidos aprovechables.** Son todos los residuos susceptibles de ser sometidos a procesos de recuperación, reutilización, reciclaje, tratamiento biológico o de obtención de energía.

**Residuos sólidos biodegradables.** Son materiales susceptibles a la acción transformadora por acción de microorganismos.

**Residuos sólidos domiciliarios.** Son los generados en los hogares como resultado de actividades domésticas.

**Residuos sólidos especiales.** Son residuos de características diversas cuyas formas de recolección, tratamiento y/o disposición final requieren condiciones particulares para cada tipo de residuo.

**Residuos sólidos industriales.** Son los residuos sólidos cualquiera sea su estado y grado de peligrosidad, que provienen de cualquier actividad industrial o manufacturera.

**Residuos sólidos industriales asimilables a domiciliarios.** Son aquellos que si bien son generados en industrias por sus características pueden ser manejados conjuntamente con los residuos domiciliarios.

**Residuos Sólidos Municipales.** Son aquellos que se generan en las viviendas, parques, jardines, vía pública, oficinas, mercados, comercios, demoliciones, construcciones, instalaciones, establecimientos de servicios y en general todos aquellos generados en actividades municipales que no requieran técnicas especiales para su control, excepto los peligrosos y potencialmente peligrosos de hospitales, clínicas, laboratorios, actividades industriales, artesanales, comerciales y centros de investigación.

**Residuos sólidos orgánicos.** Comprende los residuos generados principalmente en lugares donde se realice actividades de cocina, consumo de alimentos, jardinería y poda de plantas, centros de abasto de frutas, verduras u otros productos generados por acción de la naturaleza. Su característica principal es que pueden ser descompuestos por la acción natural de organismos vivos como lombrices, bacterias y hongos principalmente.

**Residuos sólidos peligrosos.** Son aquellos que conllevan riesgo potencial al ser humano o al ambiente, por poseer cualquiera de las siguientes características: corrosividad, explosividad, inflamabilidad, patogenicidad, bioinfecciosidad, radiactividad, reactividad y toxicidad.

**Reutilización.** Cualquier operación mediante la cual se vuelve a utilizar el residuo en el estado en que se encuentre.

## S.

**Suelo:** Material o cuerpo natural compuesto por partículas sueltas no consolidadas de diferentes tamaños y de un espesor que varía de unos centímetros a unos cuantos metros, el cual está conformado por fases sólida, líquida y gaseosa, así como por elementos y compuestos de tipo orgánico e inorgánico, con una composición variable en el tiempo y en el espacio.

**Saneamiento.** Control de todos los factores del ambiente físico del hombre que ejercen o pueden ejercer un efecto pernicioso en su desarrollo físico, salud y supervivencia.

#### **T.**

**Talud.** Inclinação de un dique, terraplén o desmonte.

**Terraplén.** Macizo de tierra con que se rellena un hueco o que se levanta para hacer una defensa, un camino u otra obra semejante.

**Terrazas.** Ordenamiento de las pendientes muy inclinadas con el fin de crear parcelas horizontales.

**Tratamiento de residuos sólidos.** Conjunto de operaciones encaminadas a la transformación física, química, térmica o biológica de los residuos para el aprovechamiento de los recursos contenidos en ellos o para reducir la peligrosidad de los mismos.

#### **U.**

**Usuario.** Persona natural o jurídica que se beneficia con la prestación de un servicio público, ya sea como propietario del inmueble en donde este se presta o como receptor directo de dicho servicio.

#### **V.**

**Vectores.** Seres vivos que intervienen en la transmisión de enfermedades al llevarlas de un enfermo o de un reservorio a una persona sana.

**Vida útil:** Es el periodo de tiempo en que el sitio de disposición final será apto para recibir los residuos sólidos urbanos y de manejo especial. El volumen de los residuos y material térreo depositados en este periodo, es igual al volumen de diseño.

# **CAPÍTULO I: GENERALIDADES**



## CAPITULO I: GENERALIDADES

La gestión de residuos sólidos en Bolivia, presenta dificultades en los diversos componentes, particularmente en lo referido al ambiental y técnico de los sitios de disposición final. De acuerdo al Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia (VAPSB/DGGIRS, 2010), más del 90% de los municipios cuentan con botaderos a cielo abierto, situación que genera un riesgo permanente a la salud y al medio ambiente.

Debido a la disposición inadecuada de los residuos sólidos, el factor agua es el que presenta impactos de mayor magnitud, considerando que este recurso es utilizado para consumo humano, riego y otras actividades productivas. De la misma forma, las aguas subterráneas y suelos se ven afectados particularmente por la falta de medidas de impermeabilización ocasionando la permanente infiltración de lixiviados.

Otros de los factores ambientales, impactados es el aire, debido a la falta de recubrimiento con material de cobertura y la emisión de gases contaminantes.

A continuación, se describen los efectos generados por el manejo inadecuado de los residuos sólidos y la situación actual de la gestión de residuos sólidos en Bolivia.

### 1.1 Efecto del manejo inadecuado de los residuos sólidos en la salud de la Población

El manejo inadecuado de los residuos sólidos puede generar significativos impactos negativos para la salud humana. Los residuos son una fuente de transmisión de enfermedades, ya sea por vía hídrica o por alimentos contaminados por moscas y otros vectores. Si bien algunas enfermedades no pueden ser atribuidas a la exposición de los seres humanos a los residuos sólidos, el inadecuado manejo de los mismos crea condiciones para contraer dichas enfermedades.

Los contaminantes biológicos y químicos de los residuos son transportados por aire y agua, causando contaminación de los recursos naturales.

Los más susceptibles de ser afectados, son las personas expuestas que viven en los asentamientos pobres de las áreas marginales urbanas y que no disponen de un sistema adecuado de recolección domiciliar regular. Otro grupo de riesgo, son los recolectores y los recicladores que tienen contacto directo con los residuos, muchas veces sin protección adecuada. Los recicladores y sus familias, que viven en la proximidad de los botaderos pueden ser, a su vez, propagadores de enfermedades al entrar en contacto con otras personas.

El polvo transportado por el viento desde un botadero a cielo abierto puede portar patógenos y materiales peligrosos. En estos sitios, durante la biodegradación de la materia orgánica se generan gases orgánicos volátiles, tóxicos y algunos potencialmente carcinógenos (por ejemplo, bencina y cloruro vinílico), así como subproductos típicos de la biodegradación (metano, sulfuro de hidrógeno y bióxido de carbono).

### 1.2 Efectos del Manejo Inadecuado de los Residuos Sólidos en el Medio Ambiente

**Contaminación del Agua.-** Es uno de los problemas más serios provocados por los sitios de disposición final de los residuos. El proceso de descomposición de los residuos sólidos genera líquidos percolados (lixiviados) que pueden contaminarse con una gran variedad de agentes biológicos (bacterias, virus) y químicos (metales, pesticidas, solventes orgánicos) en su migración a través de la celda del relleno sanitario o botadero. Los lixiviados pueden filtrarse hacia las aguas

superficiales y subterráneas que alimentan ríos y pozos. Todo esto constituye una gran amenaza para la vida silvestre del lugar y para la salud de los vecinos.

**Contaminación del Aire.-** Ocurre porque los gases liberados pueden contribuir al efecto invernadero si no reciben tratamiento adecuado. Los más importantes son el metano y el dióxido de carbono. Otros compuestos orgánicos, potencialmente tóxicos o cancerígenos, pueden ser arrastrados por los flujos de gas metano o anhídrido carbónico.

La quema al aire libre de los residuos o su incineración sin equipos de control adecuados, genera gases y material particulado, tales como, furanos, dioxinas y derivados organoclorados, problemas que se acentúan debido a la composición heterogénea de residuos con mayores contenidos de plásticos.

**Figura 1.1: Contaminación de Fuentes con Residuos Sólidos**

**De Agua**



**De Aire**



**De Suelo**



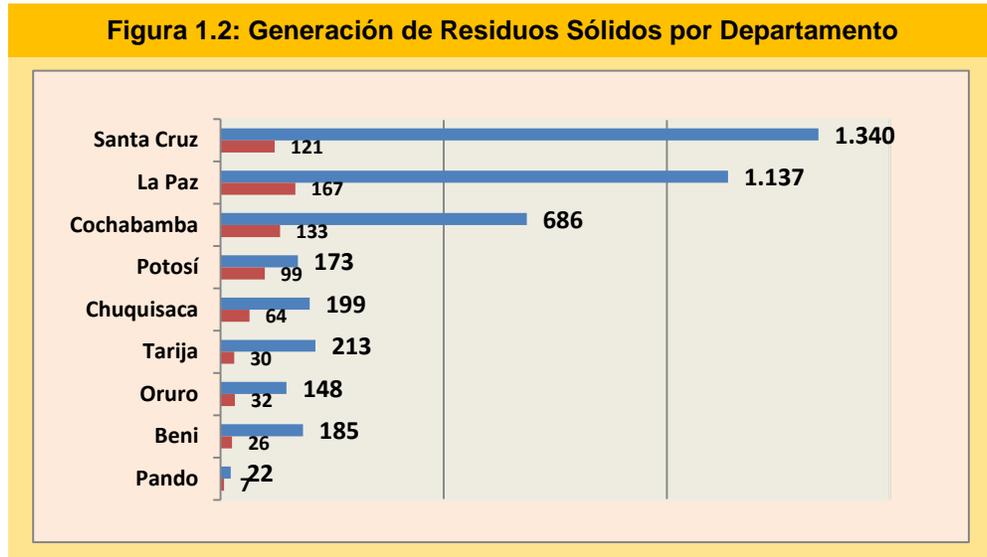
Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS

**Contaminación del Suelo.-** La descarga y acumulación de residuos en sitios periurbanos, urbanos o rurales producen impactos estéticos, malos olores y polvos irritantes. La disposición de residuos en un botadero a cielo abierto o en un sitio mal operado, contamina el suelo con microorganismos patógenos, metales pesados, sustancias tóxicas e hidrocarburos que están presentes en el lixiviado.

### 1.3 Situación del Manejo de los residuos sólidos en Bolivia

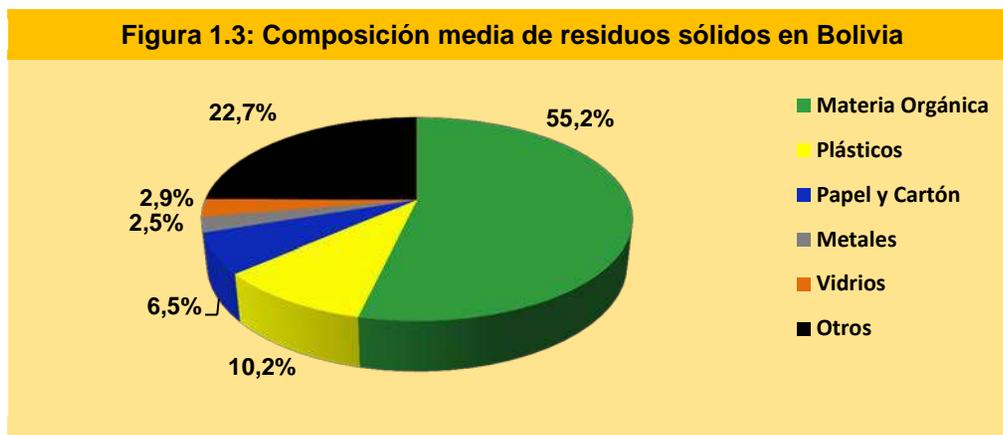
El manejo inadecuado de los residuos sólidos, se ha convertido en uno de los principales problemas que afectan al medio ambiente y la salud, más aún cuando estos son dispuestos de forma incontrolada e indiscriminada, principalmente los residuos no biodegradables y peligrosos que muchas veces son expuestos a cielo abierto a quemas incontroladas creando riesgos de contaminación hacia los recursos hídricos, suelo y aire.

El Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia (VAPSB/DGGIRS/2010), indica que en el país se genera aproximadamente 4.782 Ton/día de los cuales el 87% corresponde al área urbana y el 13% al área rural. En función a los datos obtenidos por categoría poblacional, se estima que el Índice Promedio Ponderado de Producción Per Cápita de residuos sólidos domiciliarios en Bolivia es de 0,50 Kg/habitante-día.



Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS/ Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia

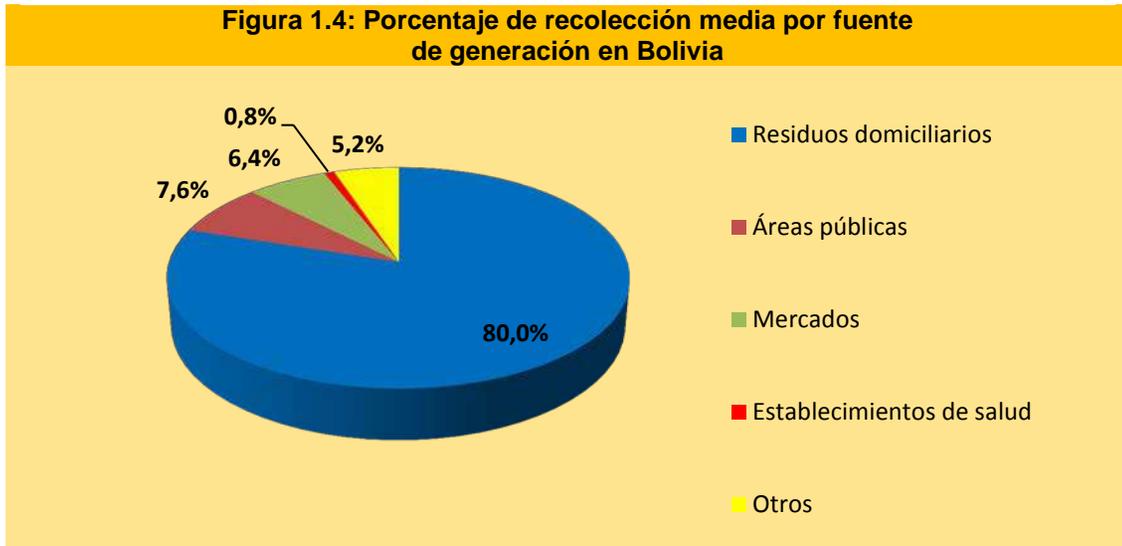
Respecto a su composición, el 55,2% son residuos orgánicos o biodegradables, el 22,1% son reciclables y el 25,6% son residuos no aprovechables.



Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS/ Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia

Del total de residuos que se recolectan, aproximadamente el 80% provienen de fuente domiciliaria, de acuerdo a la siguiente figura:

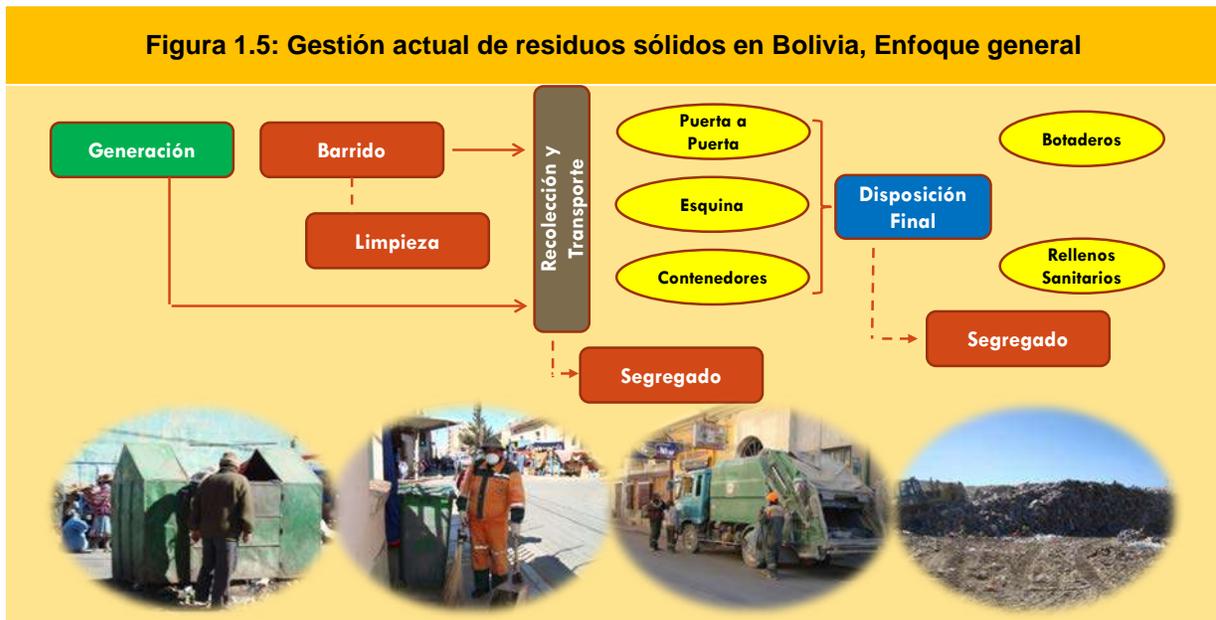
**Figura 1.4: Porcentaje de recolección media por fuente de generación en Bolivia**



Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS/ Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia

La gestión de los residuos sólidos en Bolivia está dirigida principalmente a la gestión de los servicios de aseo, especialmente en la recolección y transporte y en el mejor de los casos a la disposición final, aunque con algunas deficiencias técnicas y ambientales. Las demandas de servicio, han superado la capacidad técnica y financiera de atención, generando recurrentes deficiencias en la prestación y en algunos casos ha derivado en colapsos ambientales que requieren de pronta atención.

**Figura 1.5: Gestión actual de residuos sólidos en Bolivia, Enfoque general**



Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS/ Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia

Principalmente, en las ciudades capitales y algunos municipios mayores, la gestión de los servicios se realiza a través de entidades municipales de aseo, algunas descentralizadas y otras desconcentradas de los gobiernos municipales. En el resto de los municipios el servicio es gestionado por los gobiernos municipales de manera directa.

La disposición final de residuos sólidos corresponde a la última etapa del manejo de residuos y es la que mayores problemas representa por los impactos ambientales generados. Se estima que del total de municipios en el país, el 90,8% cuentan con botaderos a cielo abierto, el 6,1% con botaderos controlados y sólo el 3,1% cuentan con rellenos sanitarios.



Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS/ Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia

No obstante, no se trata de mantenerse en los sistemas convencionales de manejo que a modo de resumen consiste en la generación, recolección, transporte y disposición final, aun siendo estos controlados, se debe anteponer siempre el principio de jerarquización del manejo de residuos sólidos que establece que en primera instancia se debe buscar la prevención en la generación del residuo, en segunda instancia el aprovechamiento mediante la reutilización, reciclaje, tratamiento biológico o bien el aprovechamiento energético siempre que se cumplan las normas reglamentarias y en última instancia, la disposición final de aquellos residuos sólidos que no pudieron ser aprovechados. En consecuencia, la aplicación gradual de este principio permitirá disminuir los impactos ambientales y alargar la vida útil de los espacios disponibles.

## 1.4 Responsabilidad del Manejo de Residuos Sólidos

El manejo de los residuos sólidos es responsabilidad de todos, puesto que involucra espacios de participación de los diferentes actores de la sociedad, es decir de la población como sujeto generador; de las autoridades locales, departamentales y nacionales como entes normadores, de establecimiento de políticas, gestión de recursos, de control, operación de los servicios entre otros; de las instituciones productivas y de servicios en el marco de la responsabilidad extendida y de los operadores del servicio de aseo de manera que aseguren el adecuado manejo de los residuos sólidos hasta su disposición final.

## 1.5 Marco Legal

Como instrumento normativo, se cuenta con el Reglamento de Gestión de Residuos Sólidos (aprobado mediante Decreto Supremo N° 24176, del 8 de diciembre 1995), de la Ley de Medio Ambiente N° 1333, que tiene por objeto “establecer el régimen jurídico para la ordenación y vigilancia de la gestión de los residuos sólidos, fomentando el aprovechamiento de los mismos mediante la adecuada recuperación de los recursos en ellos contenidos”. Particularmente en el capítulo IX “De la Disposición Final de Residuos Sólidos” se hace una descripción referente al tipo de relleno, método de operación, las obras de diseño, las instalaciones y equipamiento, las condiciones para su funcionamiento, los requisitos ambientales para funcionamiento, cierre y monitoreo.

**ARTICULO 70°** La disposición final de los residuos que no sean reutilizados, reciclados o aprovechados, deberá llevarse a cabo evitando toda influencia perjudicial para el suelo, vegetación y fauna, la degradación del paisaje, la contaminación del aire y las aguas, y en general todo lo que pueda atentar contra el ser humano o el medio ambiente que lo rodea.

**ARTICULO 71°** La operación de todos los sitios de disposición final para residuos sólidos deberá realizarse conforme al método de relleno sanitario.

Las Normas Bolivianas NB 742-760 del Instituto Boliviano de Normalización de Control y Calidad, aprobadas mediante Resolución Secretarial, N° 383 del (28 de noviembre de 1996) del Ministerio de Desarrollo Humano, tienen como objetivo “regular, ordenar el diseño y consecuentemente la planificación del manejo de los residuos sólidos, mejorando las condiciones del medio ambiente y por ende el bienestar y salud del pueblo boliviano”. Dentro de estas normas se encuentran:

**NB 757** *“Características que deben reunir los sitios para ubicar sistemas de disposición de residuos sólidos municipales”, que tiene por objeto y campo de aplicación “establecer las condiciones de ubicación, hidrológicas, geológicas e hidrogeológicas que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales y es de observancia obligatoria para los responsables de la evaluación, análisis y selección de dichos sitios. Esta Norma es de observancia obligatoria también en el caso de ampliación de un relleno sanitario”.*

**NB 760** *“Requisitos para el diseño, construcción, operación y monitoreo de un relleno sanitario”, que tiene por objeto “proteger el medio ambiente y la salud, estableciendo los requisitos a los que deberán ajustarse el diseño, construcción, operación y monitoreo de un relleno sanitario”.*

# **CAPÍTULO II: MARCO CONCEPTUAL**



## CAPITULO II: MARCO CONCEPTUAL

### 2.1 Definición

Si bien existen varias definiciones de “Relleno Sanitario”, por lo general dichas definiciones coinciden en la precisión de palabras clave, como ingeniería, técnica, control, medio ambiente y salud.

El Reglamento de Gestión de Residuos Sólidos (1995), de la Ley de Medio Ambiente N° 1333, define Relleno Sanitario como:

*“Obra de ingeniería para la disposición final segura de residuos sólidos en sitios adecuados y bajo condiciones controladas, para evitar daños al ambiente y la salud”.*

Por otro lado, la “Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales”, del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (OPS/CEPIS, 2002) indica la siguiente definición:

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

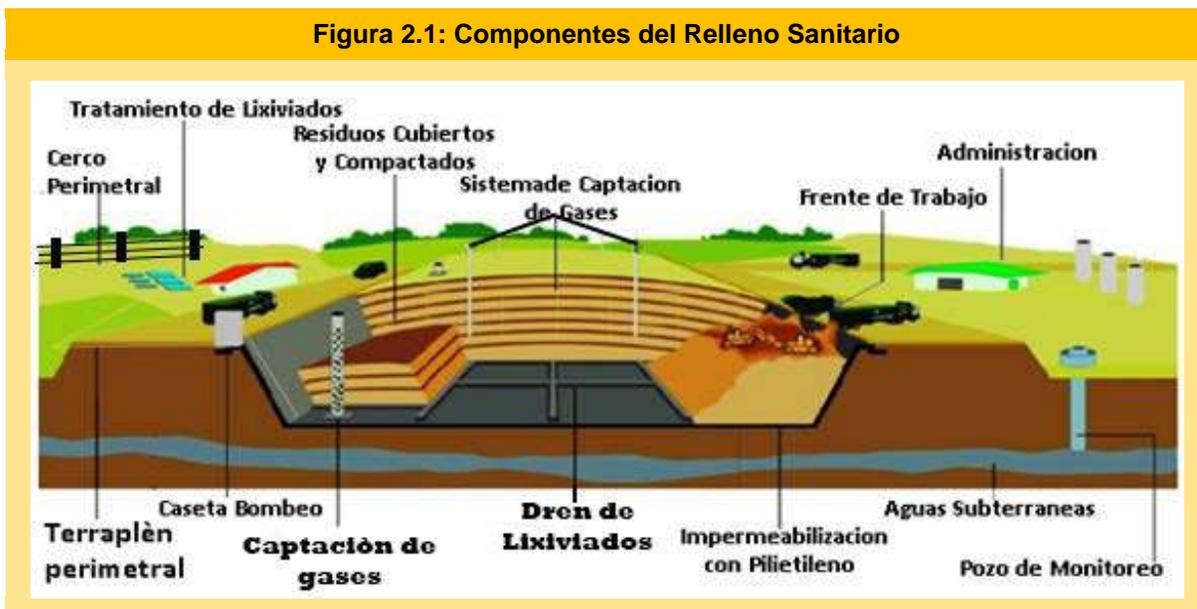
A su vez, el Informe de la “Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe”, de la Organización Panamericana de Salud, el Banco Interamericano de Desarrollo y la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (OPS/BID/AIDIS-2010), en la definición de Relleno Sanitario realiza una descripción más amplia respecto a la característica en la operación y las condiciones para su funcionamiento. La definición es la siguiente:

*“Técnica de ingeniería para el confinamiento de los residuos sólidos municipales. Comprende el esparcimiento, acomodo y compactación de los residuos sobre un lecho impermeable, su cobertura con tierra u otro material inerte por lo menos diariamente, para el control de la proliferación de vectores y el manejo adecuado de gases y lixiviados, con el fin de evitar la contaminación del ambiente y proteger la salud de la población. El relleno sanitario cuenta con proyecto de ingeniería, control de ingreso en la puerta, pesaje y no existen segregadores en el sitio”.*

El éxito de un Relleno Sanitario radica en la adecuada selección del sitio, en su diseño y, por supuesto, en su óptima operación y control.

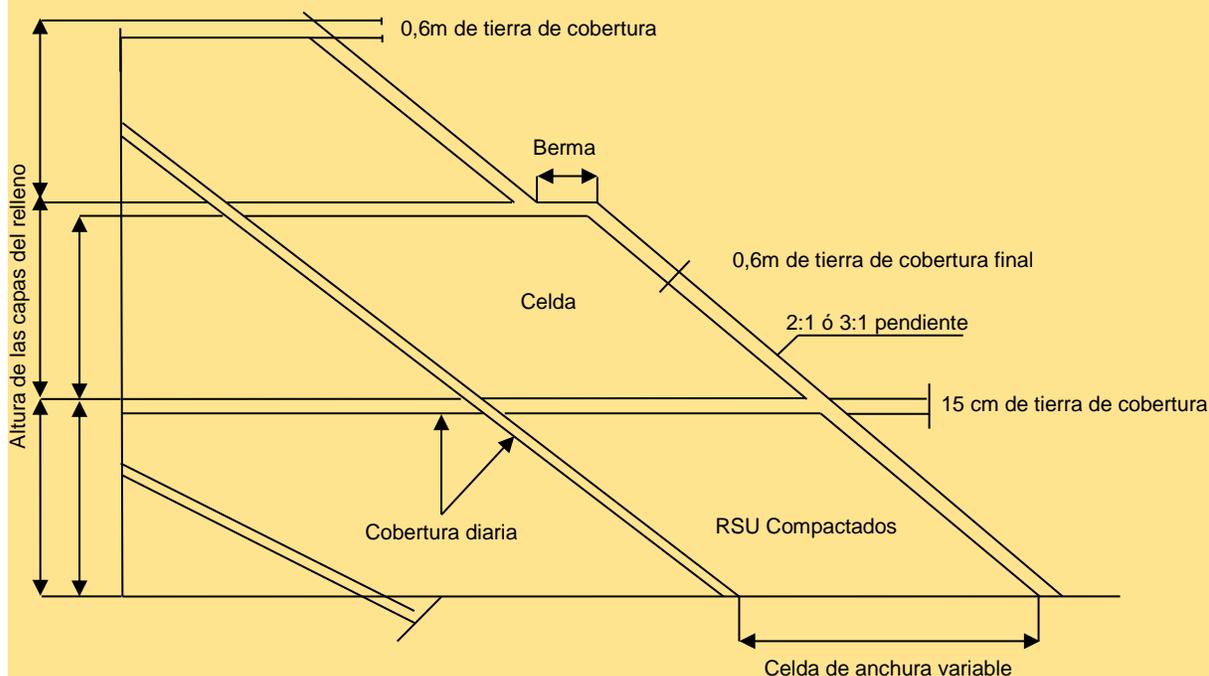
A modo de referencia, en la siguiente figura se mencionan los componentes que forman parte del Relleno Sanitario, más adelante se detallan cada uno de ellos:

Figura 2.1: Componentes del Relleno Sanitario



- ♻️ **Celda:** Volumen de material depositado en un relleno sanitario durante un período de explotación relativamente corto, de días. Una celda incluye los propios residuos sólidos depositados y el material de cobertura con frecuencia diaria y cuyo objetivo es eliminar la existencia de olores procedentes de la descomposición de éstos. Esta cobertura tendrá un espesor de unos 15 cm de un material con características determinadas y que preferiblemente se pueda extraer de una zona cerca al relleno sanitario para minimizar costos de transporte.
- ♻️ **Berma:** Son terrazas utilizadas cuando la altura del relleno sanitario es considerable y tienen como objetivo mantener su estabilidad. También son utilizadas para la ubicación de los canales para el drenaje de aguas superficiales y tuberías para la recuperación de gas.
- ♻️ **Impermeabilización de la celda:** Se realiza con materiales naturales y/o artificiales en función de la magnitud y tipo de relleno. Estos materiales deben recubrir el fondo y las superficies naturales. Los recubrimientos son diseñados para proveer la impermeabilización del vaso y evitar la migración del lixiviado.
- ♻️ **Lixiviado:** Líquido producido por la humedad presente en los residuos y cuando el agua procedente de la escorrentía superficial y/o lluvia se pone en contacto con los residuos depositados y adquiere características de líquido contaminante.
- ♻️ **Frente de Trabajo:** Es el lugar donde los vehículos descargan los residuos para su posterior colocación, compactación y recubrimiento.
- ♻️ **Biogás:** Mezcla de gases, producto del proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica o biodegradable de los residuos, cuyos componentes principales son el metano y dióxido de carbono.

**Figura 2.2: Esquema general de los rellenos sanitarios**



Fuente: Tratamiento y Gestión de Residuos Sólidos, Colomer F, Gallardo Antonio, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2007

## 2.2 Tipos de Relleno Sanitario

### 2.2.1 Relleno Sanitarios en función a la Técnica de Disposición

En relación a técnica de disposición, existen tres tipos de rellenos sanitarios, las cuales están en función a la cantidad generada y población.

- a) **Relleno Sanitario Manual**, es un método diseñado para poblaciones menores a 40.000 habitantes, cuya generación de residuos sólidos no exceda de 20 Toneladas/día. La característica principal para la disposición final, radica en el empleo de técnicas y equipo manual. Para facilitar la operación de compactado y cobertura puede considerarse el empleo de un minicargador.
- b) **Relleno Sanitario Semimecanizado**, es un método diseñado para poblaciones entre 40.000 y 100.000 habitantes cuya generación se encuentre en un rango de 20 a 40 Toneladas/día. La característica principal, radica en el empleo parcial y permanente de técnicas y equipo mecanizado para el compactado y cobertura (maquinaria pesada), como por ejemplo un bulldozer u oruga de cadenas de 45 hp. Eventualmente, de acuerdo a programación, es apoyado por maquinaria para traslado de material de cobertura.
- c) **Relleno Mecanizado**, es un método diseñado para poblaciones mayores a 100.000 habitantes y cuya generación exceda de las 40 Toneladas/día. La característica principal, radica en el empleo de maquinaria pesada combinada de manera permanente en lugar de operación, como por ejemplo: Tractor Compactador, Bulldozer, Retroexcavadora Cargadora o Pala Frontal Cargadora y equipo de apoyo (Camión Cisterna y Volquete)

En el siguiente cuadro se detallan las características principales para cada tipo de relleno:

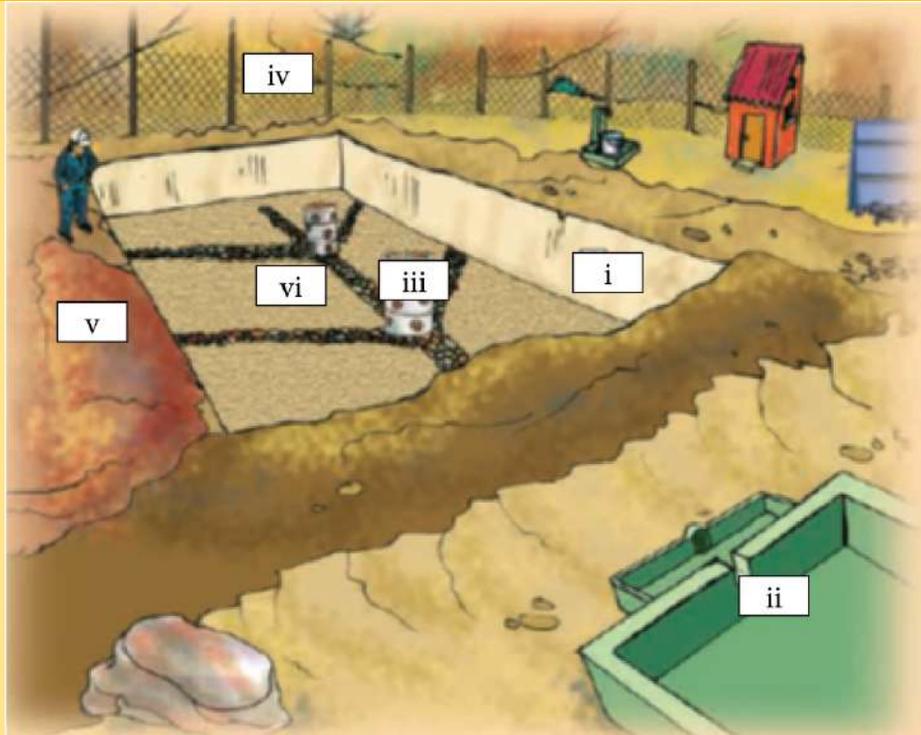
**Cuadro 2.1: Características y Tipos de Rellenos Sanitarios**

Característica	Relleno Manual	Relleno Semi mecanizado	Relleno Mecanizado
Poblaciones < 10.000 Habitantes	Si		No
Poblaciones 10.000 a 40.000 Habitantes	Se recomienda su uso, con herramientas y maquinaria adaptada	No	No
Poblaciones entre 40.000 a 100.000 Habitantes	No	Si	No
Poblaciones mayor a 100.000 Habitantes	No	No	Si
Utilización de Herramientas menores (pala, carretilla, pico, trinche, rastrillo)	Si	No	No
Utilización de Maquinaria Adaptada (Tractor agrícola) o de Potencia Menor	No	Si	No
Utilización de Maquinaria Pesada Combinada (Bulldozer ó Tractor sobre Orugas, Retro Excavadora, Pala Cargadora)	No	No	Si
Mano de Obra No Calificada (Operarios)	Si	No	No
Mano de Obra Calificada (Operarios)	No	Si	Si
Bascula de Pesaje	No	Si	Si
Impermeabilización natural de la celda (Arcilla)	Si	Si	No
Impermeabilización artificial (Geosintéticos, Geomembranas)	No	Si (Recomendable)	Si
Sistemas de Captación y Tratamiento Primario de Lixiviados	Si	Si	Si
Pozos de Monitoreo de aguas subterráneas	Si	Si	Si
Sistemas de Captación y Venteo de Biogás	Si	Si	No
Sistemas de Captación y Tratamiento de Biogás	No	No	Si
Cerco perimetral	Si	Si	Si
Caseta de Control	No	Si	Si
Área Administrativa	No	Si	Si

Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS

Los trabajos de mantenimiento se pueden hacer manualmente o con apoyo de maquinaria, dependiendo de la disponibilidad y necesidad de estas máquinas.

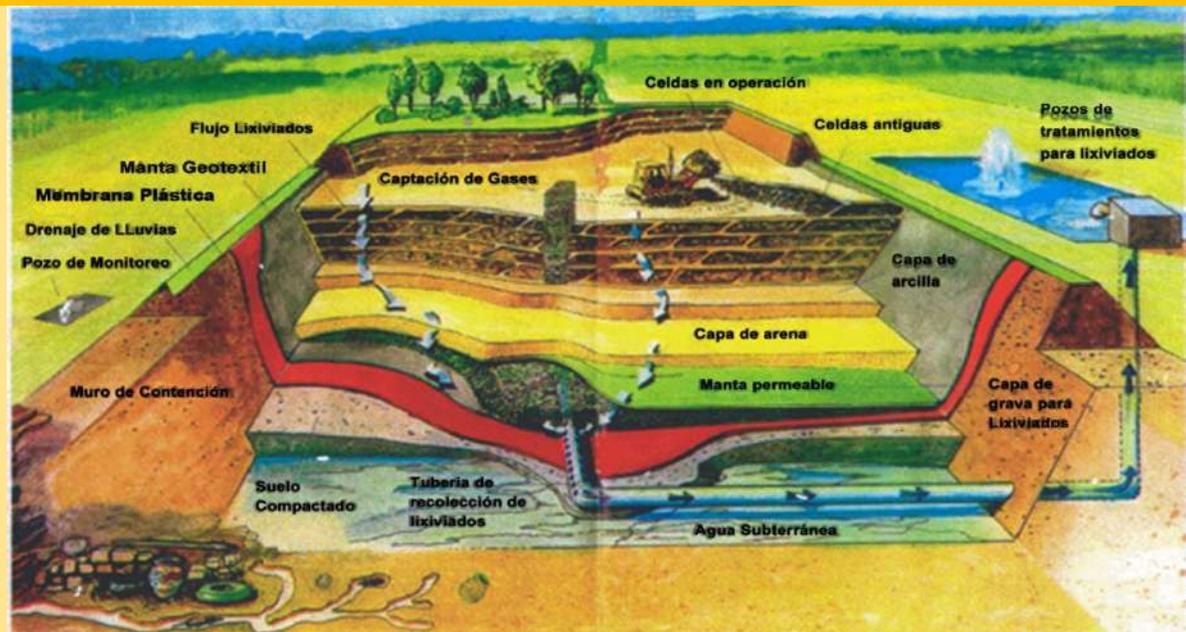
**Figura 2.3: Esquema de Un Relleno Sanitario Manual**



(i) una zanja o trinchera para la disposición de los residuos,  
 (ii) un sistema de recolección y almacenamiento de los lixiviados para su secado;  
 (iii) un sistema para la dispersión de gases;  
 (iv) un cerco perimetral seguro;  
 (v) material de cobertura para el recubrimiento de los residuos sólidos; y,  
 (vi) impermeabilización con arcilla compactada.

Fuente: Rellenos Sanitarios para Poblaciones Menores a 10.000 habitantes, Cooperación Danesa, Bolivia, 2008

**Figura 2.4: Esquema de Un Relleno Sanitario Semi Mecanizado o Mecanizado**



Un relleno sanitario mecanizado debe contar con: (1) celdas de confinamiento; (2) red de captación de lixiviados; (3) red de chimeneas de venteo; (4) Camino perimetral; (5) Dren perimetral; (6) Laguna de Lixiviados; (7) Taller de Servicios; (8) residuos compactados; (9) bascula; (10) oficinas administrativas; (11) cortina arbórea; (12) caseta de vigilancia; (13) acceso; (14) cortina arbórea; (15) malla perimetral y (16) pozos de monitoreo

Fuente: Rellenos Sanitarios, Presentación: Sandoval Leandro, Organización Panamericana de Salud, Cochabamba, 2005

## 2.2.2 Rellenos Sanitarios en función a los residuos depositados<sup>1</sup>

La Directiva de la Unión Europea mediante Consejo 1993/31 /CE, relativo al vertido de residuos sólidos, establece una clasificación genérica de los rellenos sanitarios en función de los residuos que van a ser dispuestos en ellos. Estos son:

Relleno Sanitario para residuos peligrosos, considerándose “residuos peligrosos”, todo residuo comprendido en el ámbito de aplicación del apartado 4 del artículo 1 de la Directiva 91/689/CEE. Para fines de aplicación a nuestro país todo aquello que tenga características intrínsecas de: corrosividad, explosividad, inflamabilidad, patogenicidad o bioinfecciosidad, radioactividad, reactividad y toxicidad. Para su clasificación en el país se dispone de la Norma Boliviana NB 758, que establece las “Características, Listados y Definición de los Residuos Peligrosos y de Bajo Riesgo”. Por otro lado, se dispone también de la Norma Boliviana NB 759 referente a las “Características que Deben Reunir los Sitios destinados al confinamiento de los residuos peligrosos (Excepto para residuos radiactivos)”

Relleno Sanitario para residuos no peligrosos, considerándose “residuos no peligrosos los que no están incluidos en el tipo anterior. Para fines de la presente guía y de acuerdo a la Norma Boliviana NB 757 se consideran como residuos sólidos municipales<sup>2</sup>.

Relleno Sanitario para residuos inertes, considerándose “residuos inertes”, los residuos que no experimenten transformaciones físicas, químicas o biológicas significativas. Los residuos inertes no son solubles ni combustibles, no reaccionan física ni químicamente de ninguna otra manera, ni son biodegradables, ni afectan negativamente a otras materias con las cuales entran en contacto de forma que pueda dar lugar a contaminación del medio ambiente o perjudicar a la salud humana.

La lixiviabilidad total, el contenido de contaminantes de los residuos y la ecotoxicidad del lixiviado deberán ser insignificantes, y en particular no deberán suponer un riesgo para la calidad de las aguas superficiales y/o subterráneas. En nuestro país, no se dispone una normativa específica para el manejo de este tipo de residuos<sup>3</sup>, por lo que dependiendo sus características podrán ser depositadas en los rellenos convencionales.

---

<sup>1</sup> Tratamiento y Gestión de Residuos Sólidos, Colomer M. Francisco; Gallardo I. Antonio, Universidad Politécnica de Valencia, 2007, España.

<sup>2</sup> Los Residuos Sólidos Municipales, son aquellos que se generan en las viviendas, parques jardines, vía pública, oficinas, mercados, comercios, demoliciones, construcciones, instalaciones, establecimientos de servicios y en general todos aquellos generados en actividades municipales que no requieran técnicas especiales para su control, excepto los peligrosos y potencialmente peligrosos de hospitales, clínicas, laboratorios, actividades industriales, artesanales, comerciales y centros de investigación.

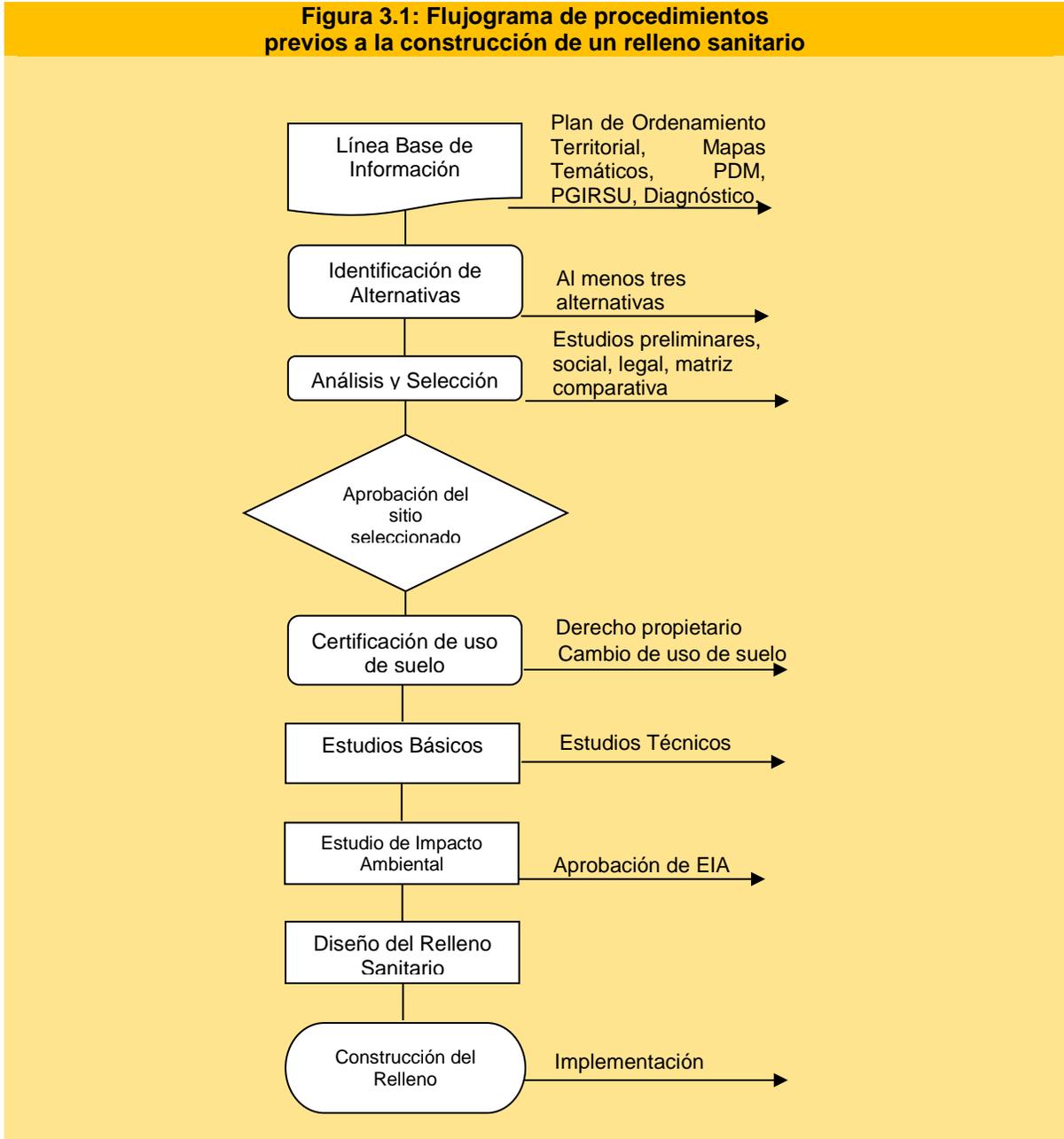
<sup>3</sup> El Reglamento de Gestión de Residuos Sólidos de la Ley de Medio Ambiente N°1333, en el Artículo 13, establece como atribución y competencia de los gobiernos municipales, elaborar reglamentos específicos para el manejo de residuos especiales, sólidos acumulados en cauces de ríos, lodos, restos de mataderos, residuos inertes y escombros, así como para los especificados en el segundo párrafo del artículo 4º del presente Reglamento.

# **CAPÍTULO III: PROCEDIMIENTOS PREVIOS A LA CONSTRUCCIÓN DE UN RELLENO SANITARIO**



### CAPITULO III: PROCEDIMIENTOS PREVIOS A LA CONSTRUCCIÓN DE UN RELLENO SANITARIO

La implementación y operación de un relleno sanitario requiere primordialmente, el compromiso y la responsabilidad del gestor o titular, partiendo de un proyecto que cuente con la aprobación y autorización correspondiente antes de su implementación de manera de garantizar su sostenibilidad. Los pasos previos a la construcción de un relleno sanitario se detallan en el siguiente flujograma:



Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS

### 3.1 Línea Base de Información y Diagnóstico

Las actividades preparatorias inician con la revisión y complementación de los lineamientos y estrategias locales de los documentos pre existentes (línea base) elaborados en el área de influencia del Proyecto referente a: Plan de Ordenamiento Territorial, Plan de Desarrollo Municipal, Plan/Programa Gestión Integral de Residuos Sólidos, Proyectos que contengan información de relevancia en residuos sólidos municipales (RSM) y toda información antecedente proveniente de fuentes secundarias que permitan caracterizar el área de estudio y la gestión actual de los RSM.

Dependiendo si es un proyecto de Gestión Integral de Residuos Sólidos, el Diagnóstico ya estaría incluido en el mismo de acuerdo a las recomendaciones de la Guía de Presentación de Proyectos de Preinversión de Residuos Sólidos. De tratarse de un proyecto específico de Relleno Sanitario deberá desarrollarse de la siguiente forma:

- 1) **Análisis territorial del área de influencia de estudio:** Describe el contexto general del municipio, la división política-administrativa, límites, superficie, descripción climática, precipitación anual, dirección predominante del viento, fenómenos meteorológicos de relevancia, descripción de suelos, geomorfología, hidrogeología, hidrografía, caracterización del medio biótico flora y fauna, tipos de ambientes, análisis de vulnerabilidad, áreas sensibles o manejo especial, áreas de interés arqueológico, cultural o patrimonial, población (permanente y flotante), cantidad de hogares, proyecciones poblacionales, infraestructura vial y vías de comunicación relevante, servicios básicos, desarrollo urbano, uso de suelo y actividades económicas desarrolladas.
- 2) **Gestión de residuos de sólidos municipales:** Describe las fuentes de generación, cuantificación (Producción Per-cápita), composición de los residuos sólidos (podrá estar apoyado de un estudio de caracterización de residuos sólidos pre existente previamente validado), proyecciones de crecimiento, modalidad de gestión de residuos sólidos con la descripción de los sub servicios que se realizan, su organización institucional, marco normativo, aspectos económicos y socio educativos. Particularmente se relevará el o los sitios de disposición final en operación y abandonados con carácter municipal de acuerdo a su importancia, donde se deberá determinar el área afectada y el volumen de residuos sólidos dispuestos, límites del predio, y titularidad del mismo, el estado y características del entorno, la ubicación del mismo en coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM), el levantamiento topográfico, el área total del predio, indicando la superficie ocupada y disponible. Cantidad de residuos dispuestos, y tasa de ingreso diario registrado (si existe báscula de pesaje). En relación a la existencia de micro residuos sólidos, se relevará su ubicación, cantidad y tipo de residuos depositados, área ocupada, estado y condiciones del entorno.

#### 3.1.1 Identificación de los principales actores del sector

Para facilitar el proceso de identificación de sitios alternativos para el emplazamiento del relleno sanitario, deberá realizarse también, un relevamiento de los principales actores influyentes en el sector tales como: actores públicos (instituciones públicas), actores directos (población beneficiada, comunidades) y actores de apoyo (organizaciones sociales, organizaciones no gubernamentales, cooperación externa, sector productivo, recicladores, entre otros)<sup>4</sup>.

- ♻️ **Actores Directos.** En general son el conjunto de personas y comunidades que reciben el servicio de los actores públicos. Generalmente se hallan organizados en, sindicatos, organizaciones originarias, juntas vecinales, asociaciones, empresas, gremios, etc.
- ♻️ **Actores Públicos.** Son el conjunto de entidades públicas que forman parte del sector, y tienen el mandato de brindar servicios y/o productos a los actores directos. Comprende a

<sup>4</sup> "Guía Metodológica para la formulación de Planes Sectoriales de Desarrollo", Viceministerio de Planificación y Coordinación, Bolivia, 2009.

todas las entidades públicas que forman parte del sector; además de sus contrapartes en el nivel departamental y nacional.

- ♻️ **Actores de Apoyo.** Comprende a las instituciones y organizaciones (públicas privadas y sociales) que ayudan a cumplir los objetivos de los actores directos, a ampliar su radio de acción y sus impactos.

### 3.1.2 Conclusiones y Recomendaciones

La información recabada será ordenada y evaluada en el marco de los componentes de la gestión de residuos sólidos para generar una comprensión integral de la temática en el área de estudio, a partir de la cual se pueda identificar las distintas alternativas de gestión potencialmente aceptables para la implementación del relleno sanitario.

## 3.2 Planificación<sup>5</sup>

La planificación, permite contar con la información básica sobre la población beneficiada; la procedencia, cantidad y calidad de los residuos sólidos; la operación del relleno sanitario, el uso futuro del terreno una vez cerrado; los recursos para su financiamiento y la asistencia técnica competente.

La planificación debe incluir un programa de información a la población que explique cuáles son las ventajas y desventajas de la implantación de un relleno sanitario y la importancia del cierre técnico del botadero de residuos sólidos. El apoyo de la población es una de las metas que debe procurar cualquier administración local, puesto que sin este respaldo es muy probable que ella no pueda llevarse a la práctica o que su operación y mantenimiento sean deficientes.

Tanto la administración del gobierno municipal, como la población en general deben tener presente que un relleno sanitario, como cualquier obra de saneamiento básico, requiere recursos para su financiación en lo que concierne a los estudios para la selección del sitio, el diseño, la construcción y la fase inicial de operación. Igualmente, durante todo el tiempo de su vida útil, la administración del gobierno municipal, o quien opere el sistema, debe incluir en el presupuesto un rubro para la operación y mantenimiento del relleno sanitario.

Es fundamental que la población sea consciente de los beneficios que le reporta cerrar el botadero municipal y construir un relleno sanitario, así como del costo que demanda este proyecto. En un marco de corresponsabilidad, si la población está dispuesta a pagar, se garantizará la sostenibilidad de un buen servicio de aseo y de la operación y el mantenimiento de la obra.

Para mayor información se recomienda ver la Guía para la Formulación de Programas Municipales de Gestión Integral de Residuos Sólidos.

### 3.3 Identificación de sitios alternativos para la implementación de rellenos sanitarios

Localizar un sitio adecuado para un relleno sanitario es una de las acciones más complejas para poder iniciar un proyecto de disposición final de residuos, desde un punto de vista de gestión integral. La disponibilidad del sitio define la viabilidad o no del proyecto.

La primera acción que se debe llevar a cabo, es conocer el área general donde se puede localizar, es decir, en el municipio o en su caso en municipios vecinos (esto sucede principalmente en municipios o ciudades con alta densidad demográfica). Para la identificación de sitios alternativos, se puede recurrir

<sup>5</sup> Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales, Jaramillo Jorge, OPS/CEPIS/PUB/02.93, Antioquia, Colombia, 2002

a la información cartográfica disponible en los Planes de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Municipal o información proporcionada por la Unidad de Catastro u otras instancias de manera de identificar áreas potenciales que no afecten a los procesos de crecimiento urbano, las condiciones productivas y los recursos naturales.

Siempre y cuando cumpla con la normativa nacional vigente, los requerimientos de superficie y en caso de no existir sitios alternativos, se podrá analizar la rehabilitación del actual sitio de disposición final (botadero) para el emplazamiento del nuevo relleno sanitario; en muchos casos desde un punto de vista social y económico, es mejor impulsar esta actividad. De no darse esa posibilidad, el sitio actual (botadero) deberá ingresar a un proceso de cierre técnico.

Al respecto, el Reglamento de Gestión de Residuos Sólidos, referente a la identificación de sitios señala lo siguiente:

**Artículo 72º** El establecimiento de un relleno sanitario, se trate éste de municipal o particular, deberá ubicarse en lugar apropiado y de acuerdo a normas técnicas elaboradas para tal fin, las cuales deben cumplir la LEY y Reglamentos conexos y aplicables.

**Artículo 76º** Cuando un municipio, por no disponer de lugar adecuado dentro de su jurisdicción, se vea precisado a situar un relleno sanitario fuera del mismo o compartirlo, deberá obtener el acuerdo necesario de los gobiernos municipales correspondientes.

**Artículo 82º** Cuando los municipios pretendan instalar un relleno sanitario municipal en terrenos de propiedad particular, su elección se efectuará mediante convocatoria pública para la adquisición de bienes inmuebles; caso contrario se procederá a la expropiación forzosa según las normas municipales vigentes.

### 3.3.1 Localización de sitios y Factores para Selección

Existen dos métodos que se emplean en la localización de posibles sitios para un relleno sanitario: a) por conocimiento del área y b) por los mapas sobrepuestos<sup>6</sup>. Al respecto, generalmente se aplica el criterio de conocimiento de área, que consiste en un flujo de información por parte de las autoridades del municipio, el jefe de Catastro y personas que conozcan muy bien la zona, quienes proporcionarán información acerca de las áreas que se pueden usar.

Para la localización de sitios se deberán tomar en cuenta los siguientes criterios:

-  Uso del suelo y planes de expansión urbana (si existe).
-  Mínimo impacto social y ambiental por la construcción operación y cierre.
-  Factores climáticos, topográficos, geológicos e hidrogeológicos.
-  Prevención de riesgos sanitarios y ambientales.
-  Preservación del patrimonio arqueológico y cultural de la zona.
-  Preservación de áreas naturales protegidas por el estado y conservación de recursos naturales renovables.
-  Menor vulnerabilidad del área a desastres naturales.

### 3.3.2 Área requerida

El siguiente paso, consiste en estimar de manera preliminar el área requerida para el nuevo relleno sanitario. Los datos básicos para el cálculo son: población servida, producción per cápita de residuos, densidad de los residuos sólidos estabilizados y una estimación de la altura a alcanzar.

<sup>6</sup> Diseño y operación de Rellenos Sanitarios, Collazos Héctor, Escuela Colombiana de Ingeniería, 3ra Edición, Colombia, 2008

$$A_{rs} = \frac{365,25 \times V_U \times ppc \times g^{V_U-1} \times p \cdot (1+r)^{V_U-1} \times Cob \times mc}{D_{rse} \times H_{RS}}$$

Dónde:

Ars	Área requerida para el relleno sanitario (m <sup>2</sup> )
Ppc	Producción per cápita (Kg/hab.día)
g	Tasa de crecimiento de generación de residuos sólidos (%)
p	Población (hab.)
r	Tasa de crecimiento poblacional (%)
Cob	Cobertura de recolección (%)
Mc	Factor de material de cobertura y de taludes (aproximadamente 1 a 2)
V <sub>U</sub>	Vida útil del relleno sanitario (años)
D <sub>rse</sub>	Densidad de los residuos sólidos estabilizados (Kg/m <sup>3</sup> )
H <sub>RS</sub>	Altura del relleno sanitario (m)
365,25	Factor de conversión de años a días

También debe considerarse un aumento de área para las piscinas o lagunas de lixiviados y obras complementarias, como la construcción de instalaciones administrativas, vías de circulación, patio de maniobras, maestranza o mecánica de vehículos, caseta de control, canales perimetrales, cerca perimetral, arborización perimetral y otros que se indicarán más adelante. Para el cálculo de Área Total, al Área requerida para el relleno sanitario, se incrementará entre un 20 a 30% adicional.

Es preciso anotar que el área total varía en función a la topografía y las condiciones locales del área y/o sector, sin embargo para tener datos referenciales de cuánto espacio es el que se requiere para implementar el relleno sanitario, en el siguiente cuadro se muestran de manera referencial, las cantidades requeridas de área total con un horizonte de vida útil de 20 años. Estos datos han sido calculados en base a experiencias locales, considerando un PPC de 0,5 Kg/Hab-día<sup>7</sup>, una densidad promedio de residuos estabilizados de 600 a 800 Kg/m<sup>3</sup>, una tasa de crecimiento de residuos sólidos del 1% y de la población del 2,74%<sup>8</sup> y alturas variables entre 3 a 30 m.

**Cuadro 3.1: Área Total Referencial Requerida para Relleno Sanitario por Población y Generación Total**

Municipio	Habitantes	Generación Ton/día	Área Total requerida
Población A	2000-10000	Entre 2 a 5	2 a 5 Ha
Población B	10.000-50.000	Entre 5 a 25	5 a 10 Ha
Población C	50.000-100.000	Entre 25 a 50	10 a 20 Ha
Población D	100.000-500.000	Entre 50 a 350	20 a 30 Ha
Población E	500.000-1.000.000	Entre 350 a 650	30 a 40 Ha
Población F	Más de 1.000.000	Más de 650	Más de 40 Ha

Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS

### 3.3.3 Factores a considerar para la evaluación de sitios

Identificados los terrenos posibles, se procede a realizar la valoración de los siguientes factores:

-  Ambientales
-  Técnicos

<sup>7</sup> Promedio de producción per-cápita a nivel nacional (Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia)

<sup>8</sup> Tasa promedio de crecimiento inter-censal nacional (INE, 2001)

-  Económicos
-  Legales
-  Sociales

A su vez, la Norma Boliviana NB 757, “Características que deben reunir los sitios para ubicar sistemas de disposición final de residuos sólidos municipales”, establece las condiciones de ubicación, hidrológicas, geológicas e hidrogeológicas que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales. A continuación, se describen cada uno de ellos.

### 3.3.3.1 Factores Ambientales

Los factores ambientales están relacionados con las posibles alteraciones e impactos que el relleno sanitario puede generar sobre diferentes aspectos del medio. Los factores a evaluar son:

-  **Proximidad a centros poblados:** Desde el punto de vista ambiental, la ubicación del terreno juega un papel importante en cuanto a la distancia al último centro poblado, la Norma Boliviana NB 757, recomienda que la ubicación del relleno deberá estar como mínimo a una distancia de 1.000 metros.
-  **Proximidad a aeropuertos:** De acuerdo a norma, se recomienda que la ubicación del terreno debe estar como mínimo a una distancia de 3.000 metros del aeropuerto de manera que no genere riesgo durante el despegue o aterrizaje de los aviones particularmente por la posible presencia y expansión de aves desde el relleno sanitario.
-  **Proximidad a otras instalaciones:** Se deberán listar las infraestructuras existentes cercanas al área de influencia, tales como: líneas de transmisión, torres de energía eléctrica, gasoductos, oleoductos o poliductos, acueductos, servidumbres de paso y en general las obras civiles y de comunicación. El sitio seleccionado deberá estar fuera de estas instalaciones y en su caso respetar las franjas o derechos de vía correspondiente. Para fines de la presente guía se recomienda establecer una distancia mínima de 500 m desde el límite del terreno.
-  **Presencia de zonas de recarga acuífera o fuentes de abastecimiento de agua potable:** El emplazamiento del sitio debe estar fuera de las zonas de recarga, de acuerdo a norma se establece que desde el límite del terreno, deberá considerarse una distancia mínima de 500 m a cuerpos de agua superficial y pozos de agua para consumo doméstico, industrial, riego o ganadero, de manera de evitar riesgos de contaminación, así como la inestabilidad geológica de las celdas en operación.
-  **Afectación paisajística:** Se refiere a las alteraciones al paisaje del área seleccionada, debido a su potencial natural y turístico. En lo posible, deben evitarse áreas que afecten estos aspectos.
-  **Barreras naturales (taludes, bosques):** Las barreras naturales son importantes para prevenir la dispersión de las emisiones del relleno sanitario (malos olores, gases de relleno, dispersión de materiales livianos, etc.) y mitigar el efecto visual y paisajístico del área seleccionada.
-  **Flora y fauna:** Se debe considerar que el proceso constructivo requerirá de movimiento de tierras y del medio biótico, por lo que se recomienda que el área seleccionada presente el mínimo de cobertura vegetal y fauna nativa del lugar.
-  **Existencia de áreas protegidas:** Se refiere a zonas de protección ambiental, como los parques nacionales, reservas ecológicas, bosques protegidos etc. El terreno no debe estar dentro de un área protegida, y asimismo, respetar las franjas de seguridad establecidos por la autoridad competente y/o normativa correspondiente.

- ♻️ **Área con restos arqueológicos:** Se refiere a zonas de protección arqueológica o en su caso áreas donde se han encontrado restos o vestigios arqueológicos, para lo cual se deberá respetar las franjas de delimitación del área correspondiente o colindante a la superficie, de manera de atenuar posibles impactos negativos, riesgos o daños al patrimonio.
- ♻️ **Dirección del viento predominante:** La dirección del viento predominante es importante debido a las molestias que puede causar tanto en la operación, por el polvo y papeles que se levantan, como por el posible transporte de malos olores a las áreas vecinas. En general, el sitio de emplazamiento del relleno sanitario no debe tener dirección de viento predominante a centros poblados.

### 3.3.3.2 Factores Técnicos

- ♻️ **Compatibilización con el uso de suelo y planes de expansión urbana:** La ubicación del terreno para el funcionamiento del relleno sanitario, debe estar acorde a la proyección de expansión de la población, así como también debe compatibilizar con el uso de suelos.
- ♻️ **Vida útil del terreno:** Comprende la disponibilidad de área para garantizar el funcionamiento del relleno sanitario durante el horizonte vida del proyecto, por lo que se recomienda identificar sitios que garanticen al menos una vida útil de 15 años.
- ♻️ **Topografía del terreno<sup>9</sup>:** Es importante conocer el paisaje edáfico del sitio y de sus alrededores, para diseñar las vías de acceso, las vías internas y el método de operación del relleno. El sitio debe estar localizado preferentemente en terreno con pendiente entre 3 a 12%, no debe ubicarse en terreno con pendiente mayor a 25% por las dificultades de operación que conlleva. Asimismo, terrenos con pendiente menor al 3%, generalmente son difíciles de manejar por las aguas de escorrentía y los lixiviados. Los terrenos con pendiente entre 12 a 25% presentan algunas dificultades para la operación.
- ♻️ **Permeabilidad:** Es recomendable ubicar suelos con permeabilidad menor a  $10^{-6}$  cm/s, si es mayor la alternativa podría no considerarse. Los suelos con características arcillosas (arena gruesa gredosa o greda franco arcillosa) son los más recomendables ya que son suelos poco permeables; en segundo término se pueden aceptar los limo-arcillosos (franco limoso pesado, franco limo arcilloso o arcillo limoso liviano); en tercer término están los arcillo limosos (arcillo limoso pesado y arcilloso). Se recomienda evitar los terrenos areno limosos (franco arenosos) porque son muy permeables. Para la determinación de la textura se puede utilizar la prueba de ensayo al tacto.
- ♻️ **Barreara geológica:** La barrera geológica es una capa de suelo natural de baja permeabilidad que se encuentra arriba de la primera capa freática. El valor permitido mínimo del espesor del suelo entre el nivel de desplante del suelo y el nivel máximo de subida de aguas freáticas será de 1,5 m<sup>10</sup>.
- ♻️ **Humedad<sup>11</sup>:** Interpreta la altura de la tabla de aguas<sup>12</sup> o la altura dominante del nivel freático, se debe tener presente que a mayor humedad de los suelos se tendrá mayor producción de gases y lixiviados. Para ubicar un relleno sanitario, se deben buscar primero los suelos bien drenados, con la tabla de agua medida desde el nivel de diseño a más de

<sup>9</sup> Diseño y operación de Rellenos Sanitarios, Collazos Héctor, Escuela Colombiana de Ingeniería, 3ra Edición, Colombia, 2008

<sup>10</sup> Norma Bolivia NB 757, Características que deben reunir los sitios para ubicar sistemas de Disposición Final de residuos sólidos municipales.

<sup>11</sup> Diseño y operación de Rellenos Sanitarios, Collazos Héctor, Escuela Colombiana de Ingeniería, 3ra Edición, Colombia, 2008

<sup>12</sup> La tabla del agua subterránea, generalmente llamada la tabla de agua, es la profundidad en la cual la tierra se satura, o llena a la capacidad máxima, de agua. La tabla de agua se puede medir en un agujero barrenado en el suelo. El nivel de agua en el agujero corresponde con la tabla de agua. El agua saturada puede variar. En lugares secos, la tabla de agua se encuentra a gran profundidad, pero en lugares húmedos la tabla de agua está a poca profundidad. Cuando la tabla de agua es más alta que la superficie real de tierra, aparecen los riachuelos, ríos y lagos que cubren la tierra.

tres metros de profundidad durante todo el año. En segundo término, puede aceptarse los moderadamente bien drenados, o sea aquellos en los que la tabla de agua está entre 0,5 m y 3m (medidos desde el nivel de diseño) en cierta parte del año; estos terrenos se deben drenar. Los suelos pobremente drenados, es decir, aquellos en los que la tabla de agua se mantiene entre 0,5 y 3m la mayor parte del año, no pueden ser usados o se deben drenar artificialmente. Es preferible no utilizar los suelos pobre ni muy mal drenados, o sea aquellos en los que la tabla de agua está a menos de un metro durante la mayor parte del año.

- ♻️ **pH<sup>13</sup>:** es una medida de la acidez o alcalinidad de un elemento, en este caso del suelo. A medida que aumenta hay disminución de acidez o en su caso, si hay aumento en pH la solución es más alcalina cada vez. Los suelos de textura pesada (alto contenido de arcilla) tienen una capacidad de intercambio catiónico y de amortiguación; al contrario, un suelo de textura arenosa tiene baja capacidad de intercambio catiónico. En consecuencia, se debe preferir terrenos con pH >6,0, en casos extremos, se pueden aceptar terrenos con pH entre 5,5 y 6,0; es preferible no utilizar los terrenos con pH <5,5. En su caso para subir el pH se deberá utilizar cal o usar geomembranas para aislar los residuos del suelo, sin embargo esto incrementa los costos. Este indicador se puede medir en laboratorio o mediante equipos caseros (kits de reactivos o papeles de pH)
- ♻️ **Hidrogeología:** En caso de que el sitio esté sobre rocas fracturadas o sobre materiales granulares, deberá garantizarse, que el tiempo de llegada de cualquier contaminante a un cuerpo de agua superficial o subterránea sea mayor a 150 años. Para tal efecto, se aplica la siguiente ecuación:

$$T = \left[ \frac{1}{K * \phi} \right] * E$$

Dónde:

T = es el tiempo de arribo del contaminante, en segundos.

E = es la interface del suelo entre el nivel de desplante del relleno y el nivel freático máximo de aguas freáticas, en cm.

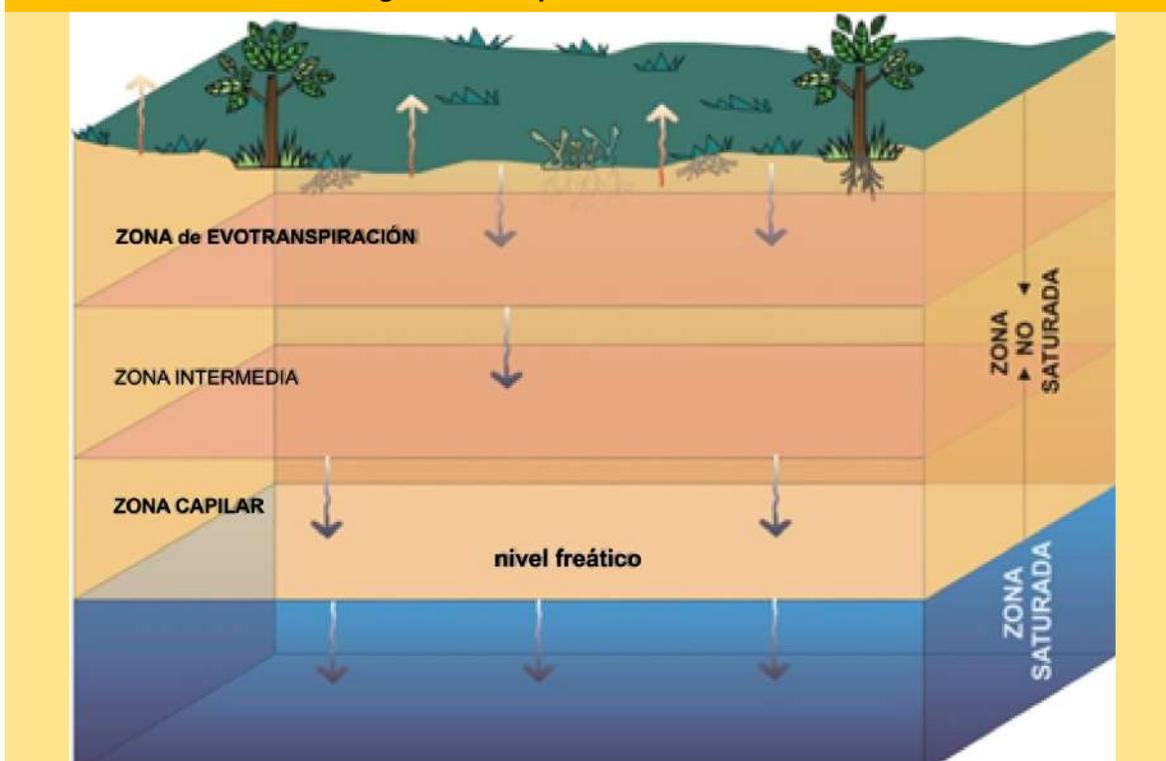
k = es la conductividad hidráulica promedio del material de la interface, en cm/s

Ø = es la porosidad promedio del material de la interface, adimensional.

- ♻️ **Condiciones sísmicas:** La ubicación de sitios para relleno sanitario, debe estar fuera de zonas sísmicas o zonas potencialmente sísmicas.
- ♻️ **Fallas geológicas:** La norma recomienda que el terreno debe estar ubicado a una distancia mínima de 60 metros de fallas geológicas que hayan tenido desplazamientos recientes.

<sup>13</sup> Diseño y operación de Rellenos Sanitarios, Collazos Héctor, Escuela Colombiana de Ingeniería, 3ra Edición, Colombia, 2008

Figura 3.2: Esquema del nivel freático



Fuente: Glosario de Términos, Ingeniería Civil y Medio Ambiente

### 3.3.3.3 Factores Económicos

- ♻️ **Distancia de recorrido en el transporte de residuos sólidos:** Se deberá evaluar la distancia de recorrido desde el centro de gravedad del municipio o localidad (por lo general corresponde a la plaza principal del casco urbano) hasta el sitio identificado. Aunque este parámetro no es determinante, sin embargo desde el punto de vista de costos de transporte y tiempos de atención, en lo posible la distancia no deberá superar los 20 Km de recorrido.
- ♻️ **Disponibilidad de material para cobertura:** Es recomendable la identificación de sitios que cuenten con material de cobertura en el mismo sector o en sus proximidades, de manera de disminuir costos en el traslado de material. Si el sitio no contara con tierra suficiente o ésta no se pudiera excavar, deberán investigarse bancos de material para cobertura en lugares próximos y accesibles tomando en cuenta el costo de transporte.
- ♻️ **Caminos de acceso:** Los sitios identificados, deberán contar preferentemente con vías y condiciones de acceso al menos regulares, esto minimizará el costo de acondicionamiento de vías. Asimismo, se deberá garantizar los derechos de vías o prever las expropiaciones necesarias.
- ♻️ **Disponibilidad de servicios básicos:** Se debe dar preferencia a sitios con infraestructura ya existente como servicios básicos (agua y luz), esto minimizará los costos de instalación de estos servicios. No obstante este factor no es determinante.
- ♻️ **Uso actual del terreno y sus colindancias:** Se debe verificar que los terrenos no cuenten con uso productivo actual, se preferirán áreas improductivas y mineralizadas por procesos erosivos. Asimismo, debe analizarse las potencialidades de la zona respecto al desarrollo urbano, agrícola, industrial u otro que podrían afectar la economía del entorno.

### 3.3.3.4 Factores Sociales

- ♻️ **Tipo de Asentamientos:** Deberá determinarse las características demográficas y sociales de cada una de poblaciones asentamientos cercanos, referente a la legalidad o no de los mismos. En terrenos donde existan asentamientos no saneados probablemente puedan presentarse mayores conflictos sociales.
- ♻️ **Opinión Pública:** Desde el inicio del proceso de selección, la población debe tener la oportunidad de participar en las propuestas realizadas. En todos los casos, es esencial asegurar el apoyo de los distintos actores de la comunidad desde la selección del sitio.
- ♻️ **Interés en el proyecto:** Durante la etapa de identificación de alternativas, se deberá evaluar el interés en el proyecto por parte de las autoridades locales y comunitarias en apoyar la implementación del nuevo relleno sanitario.
- ♻️ **Camino de acceso comunitario o de servidumbre:** Comprende la identificación y valoración de las vías de acceso hacia el terreno desde el punto de vista de usos y costumbres por parte de las comunidades colindantes.

### 3.3.3.5 Factores Legales

- ♻️ **Propiedad de terreno:** Se debe contar con un análisis legal referente a la propiedad de terreno (pública, privado, comunitario).
- ♻️ **Estado Jurídico de los predios:** Comprende la verificación legal de los documentos en los estratos judiciales que corresponde a derechos reales, de manera de verificar si los predios no tienen gravamen o hipoteca, los impuestos prediales, la función social que cumplen los predios y la legalidad de propiedad. Si se presentan dificultades jurídicas con la compra del terreno (resistencia de los propietarios, incertidumbre concerniente a los títulos de propietario etc.), la construcción del relleno sanitario se puede postergar por un lapso importante.

## 3.4 Análisis de Alternativas y Selección de la Alternativa más Conveniente

A fin de ejecutar una evaluación de los terrenos preseleccionados o alternativas para el futuro proyecto de relleno sanitario, se recomienda seguir los siguientes pasos:

- 1) Definir qué parámetros se van a utilizar para el proceso de evaluación. El parámetro debe ser cuantificable a fin de poder comparar el valor en diferentes alternativas.
  - 2) Definir los valores límite o de referencia y las opciones de calificación por cada parámetro que se utilizará en la selección. Estos valores deben guardar concordancia con lo establecido en las normas nacionales específicas y en el caso de no existir puede acudir a referencias internacionales especializadas en el diseño o la gestión de residuos.
  - 3) Definir la importancia del parámetro. Consiste en establecer un peso o importancia para cada parámetro en función de la evaluación preliminar del conjunto de los terrenos preseleccionados o alternativos, según la realidad propia de la zona.
  - 4) Definir el sistema de calificación. Para facilitar el proceso de selección del terreno más adecuado para la instalación del relleno sanitario, se puede definir una escala múltiple de calificación, que puede considerar la evaluación de la calidad del resultado respecto al parámetro evaluado.
- **Puntaje Máximo (a):** comprende el valor asignado de acuerdo a las particularidades de cada parámetro evaluado, puede variar en la escala de 3 a 1:

Mejor Valor (3), cuando cumple o sobrepasa valores límite o de referencia.

Valor Medio (2), cuando se encuentra entre los límites menor y mayor, la valoración se realiza respecto al mejor valor.

Peor Valor (1), cuando ocurre lo contrario, es decir que se encuentra fuera de los valores límite o de referencia.

- **Importancia del Parámetro (b):** La importancia del parámetro se puede establecer en función del criterio del equipo multidisciplinario. La escala puede variar de 1 a 5. Por lo general, los factores sociales y legales presentan mayor importancia, frente al resto de los factores.
- **Ponderación del Parámetro (a \* b):** Para la ponderación de los parámetros, se establece una regla de cálculo, que consiste en la multiplicación del valor de Puntaje Máximo por el valor de Importancia del Parámetro.

A continuación, se presenta un cuadro de apoyo para la selección de alternativas y selección del sitio o terreno más apto.

Cuadro 3.2: Análisis de Factores y Parámetros para la Identificación de Sitios						
Factores/ Parámetros	Valor mínimo permisible	Puntaje Máximo (a)			Importancia del Factor (b)	Ponderación del Factor (a * b)
		Mejor Valor	Valor Medio	Peor Valor		
<b>Factores Ambientales</b>		3	2	1	De 1 a 5	
Proximidad a centros poblados	1.000 m	> 1.000		< 1.000		
Proximidad a aeropuertos	3.000 m	> 3.000		< 3000		
Proximidad a otras instalaciones	1.000 m	> 1.000		< 1000		
Presencia de zonas de recarga acuífera o fuentes de abastecimiento de agua potable	500 m	> 500		< 500		
Afectación paisajística	n.c.	Baja o Inexistente	Media	Alta		
Existencia de Barreras naturales (taludes, bosques)	n.c.	Alta	Media	Baja o Inexistente		
Presencia de flora y fauna	n.c.	Baja o Inexistente	Media	Alta		
Existencia de área protegidas	n.c.	No		Si		
Área con restos arqueológicos	n.c.	No		Si		
Dirección del viento predominante	n.c.	En sentido contrario	En otro sentido	En el mismo sentido		
<b>Factores Técnicos</b>		3	2	1	De 1 a 5	

**Cuadro 3.2: Análisis de Factores y Parámetros para la Identificación de Sitios**

Factores/ Parámetros	Puntaje Máximo (a)				Importancia del Factor (b)	Ponderación del Factor (a * b)
	Valor mínimo permisible	Mejor Valor	Valor Medio	Peor Valor		
Vida útil del Terreno	15 Años	> 15 años		< 15 años		
Topografía del Terreno <sup>14</sup>	n.c	3% a 12%	12% a 25%	>25% o <3%		
Textura	n.c	Greda franco Arcillosa	Arcillo limoso	Sin presencia de arcilla		
Permeabilidad	10 <sup>-6</sup> cm/s	< 10 <sup>-6</sup>	Entre 10 <sup>-5</sup> y 10 <sup>-6</sup>	> 10 <sup>-5</sup>		
Barrera Geológica	1.50 m	> 1.50		< 1.50		
Características de Drenaje natural	n.c.	Bien drenado (> 3m todo el año)	Moderadamente drenado (Entre 0,50 m y 3 m parte del año)	Pobremente drenados Entre 0,50 m y 3 m, mayor parte del año)		
pH suelo	n.c.	> 6,0	Entre 5,5 – 6,0	< 5,5		
Hidrogeología (Manto acuífero)	150 años	> 150		< 150		
Condiciones sísmicas	n.c.	Sin Riesgo sísmico		Con Riesgo sísmico		
Fallas Geológicas	60 m	> 60		< 60		
<b>Factores Económicos</b>		<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>De 1 a 5</b>	
Distancia de recorrido en el transporte de residuos sólidos	20 Km	< 20		> 20		
Disponibilidad de material para cobertura	n.c.	Material de cobertura en el sitio	Material de cobertura próximo al sitio	Sin Material de Cobertura		
Caminos de acceso	n.c.	Transitable	Requiere hacer mejoras	Requiere apertura		
Disponibilidad de servicios básicos	n.c.	Servicios básicos de agua y luz en el sitio	Servicios básicos próximos al sitio	Sin servicios básicos		
Uso actual del terreno y sus colindancias	n.c.	Terreno improductivo	Terreno de pastoreo	Terreno productivo		
<b>Factores sociales</b>		<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>De 1 a 5</b>	
Legalidad de asentamientos	n.c.	Menor a 100 familias ilegalmente asentadas	Entre 100 y 200 familias ilegalmente asentadas	Mayor a 200 familias ilegalmente asentadas.		

<sup>14</sup> Describe el relieve y pendiente que presenta el terreno. En el caso de la pendiente puede variar en la siguiente escala: De 0 a 1% (Casi plano); de 1 a 3% (Pendiente suave); de 3 a 6% (Pendiente moderada); de 6 a 12% (Pendiente fuerte) y de 12 a 24% (Escarpa).

Cuadro 3.2: Análisis de Factores y Parámetros para la Identificación de Sitios						
Factores/ Parámetros	Valor mínimo permisible	Puntaje Máximo (a)			Importancia del Factor (b)	Ponderación del Factor (a * b)
		Mejor Valor	Valor Medio	Peor Valor		
Opinión pública	n.c.	Opinión favorable	Opinión dividida	Opinión desfavorable		
Interés en el proyecto	n.c.	Interés favorable	Interés medio	Sin Interés		
Necesidad de servidumbre para acceso	n.c.	No		Si		
<b>Factores legales</b>		<b>3</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>De 1 a 5</b>	
Derecho Propietario	n.c.	Público	Comunitario	Privado		
Estado Jurídico	n.c.	Terreno saneado	Terreno con documentación faltante	Terreno en litigio		

n.c.: no corresponde

Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS

### 3.4.1 Puntaje Máximo del Sistema de Evaluación

Es el puntaje máximo que se asigna al sistema de calificación y resulta de la sumatoria de los puntajes máximos de cada parámetro, para lo cual se establece una escala o rango de puntajes que permita la calificación de cada una de las alternativas:

Cuadro 3.3: Evaluación del Terreno	
Puntaje ponderado total	Calificación
0 – 150	Malo o Terreno No aceptable o de opción Marginal
150 – 200	Regular o terreno moderadamente aceptable
200 – 300	Bueno ó Terreno aceptable
Mayor a 300	Muy Bueno ó Terreno aceptable de Primera Opción

Fuente:

*En muy pocas ocasiones, un terreno reunirá las condiciones ideales del sitio para la construcción de un relleno sanitario. Experiencias internacionales indican que la mejor ubicación de un relleno sanitario es el área que tenga una profundidad de tres metros como barrera geológica, que sea un suelo con una pendiente del paisaje edáfico entre 3 y 12%; que sea bien drenado; que la permeabilidad sea baja, menor que 10<sup>-6</sup> cm/s; que sea un suelo de arena gruesa gredosa; que tenga un pH >6,0; que no se inunde y que no tienda a sufrir deslizamientos ni asentamientos. Si la naturaleza no nos proporciona un sitio con estas consideraciones, debe recomendarse el mejor.*

✓ Informe de Selección de Sitio

Luego de realizar el proceso de selección, el sitio que obtuvo mayor puntaje será el priorizado como la mejor opción para la futura implementación del relleno sanitario.

El resultado debe documentarse mediante la elaboración de un “Informe de Selección de Sitio”, que será la base de partida para el diseño del Relleno Sanitario, el mismo que debe contener la descripción general de las áreas evaluadas y los resultados, referente a:

- ♻️ Áreas de los terrenos.
- ♻️ Propiedad del terreno.
- ♻️ Descripción topográfica.
- ♻️ Compatibilidad con el uso de suelo.
- ♻️ Descripción general del tipo de suelo.
- ♻️ Distancia a la población más cercana.
- ♻️ Distancia a vías principales.
- ♻️ Distancia a las áreas agrícolas y ganaderas o granjas.
- ♻️ Descripción de la barrera sanitaria natural.
- ♻️ Distancia a fuentes de abastecimiento de agua.
- ♻️ Distancia a cursos superficiales de agua.
- ♻️ Distancia a aeropuertos, áreas naturales protegidas por el estado, zonas arqueológicas, entre otros.

Una vez que se cuente con la opinión favorable del terreno seleccionado para el proyecto de relleno sanitario, se iniciará el trámite para lograr las certificaciones respectivas dependiendo donde se encuentre ubicado el sitio, tales como:

- ♻️ Certificado de no encontrarse el proyecto en un área natural protegida por el estado,
- ♻️ Certificado de no encontrarse en un área vulnerable a desastres naturales
- ♻️ Certificado de no afectación de restos arqueológicos

Las certificaciones deberán presentarse en un documento anexo.

*Antes de dar inicio a los estudios específicos para el proyecto, la propiedad del terreno debe estar formalizada, caso contrario la inversión previa a la implementación correría el riesgo de perderse. Es condición imprescindible para la construcción del Relleno Sanitario que la institución gestora del proyecto asegure la tenencia del terreno, acreditando para tal efecto, el derecho propietario o algún documento legalmente válido como convenios, contratos de comodato u otros que garanticen el uso de esos predios en forma continua y permanente en la fase de ejecución del proyecto y en la posterior prestación del servicio, sin riesgo alguno.*

Con los documentos previamente citados, se dará inicio al desarrollo de los estudios básicos como el topográfico, geológico, hidrogeológico, de suelos, entre otros.

Posteriormente, se inicia con la formulación del Estudio de Impacto Ambiental del proyecto de relleno sanitario.

### 3.5 Formulación del Proyecto de Relleno Sanitario

Cuando de se trate de un proyecto de relleno sanitario debe contener:

1

Línea Base de Información,  
Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos,  
Identificación de alternativas,  
Análisis de alternativas y selección.

2

Cálculos preliminares para el diseño,  
Estudios de campo,  
Método de operación,  
Diseño del relleno sanitario,  
Sistema de manejo y tratamiento de lixiviados,  
Sistema de manejo y tratamiento de gases.

3

Preparación del terreno,  
Construcción de la capa base,  
Construcción de las celdas,  
Sistema de captación de lixiviados,  
Sistema de captación de gases,  
Sistema de drenaje de aguas superficiales,  
Obras complementarias.

4

Recursos humanos,  
Recursos en equipamiento,  
Manual de operación y Monitoreo

5

Plan cierre y pos clausura  
Plan de reforestación,  
Controles sanitarios

6

Evaluación de Impacto Ambiental  
Plan de contingencias,  
Plan de seguridad y salud ocupacional.

Complementariamente  
debe presentarse los  
siguientes documentos

- 1) Gestión Organizacional y Administrativa
- 2) Estructuración de Costos
- 3) Presupuesto de Inversiones
- 4) Anexo Planos

**Nota:** El punto 6 y documentos complementarios no forman parte de la presente guía, sin embargo deben ser considerados en la formulación y presentación del proyecto de relleno sanitario.

### 3.5.1 Planos

Los planos a desarrollar deben estar georeferenciados en coordenadas UTM; deben presentarse en planta y perfil, a una escala que se pueda apreciar con facilidad la información que se pretende mostrar (por lo general a 1:1000; 1:500 ó 1:2.500 según sea el tamaño de la infraestructura), siendo los recomendados los siguientes:

-  Plano de ubicación del proyecto.
-  Plano topográfico.

- ♻️ Plano vías de acceso internas principales y secundarias.
- ♻️ Plano del diseño de la infraestructura.
- ♻️ Plano de Instalaciones auxiliares.
- ♻️ Plano de distribución de celdas.
- ♻️ Plano de cortes longitudinales y transversales de las celdas o plataformas.
- ♻️ Plano de drenaje de aguas superficiales.
- ♻️ Plano de sistema de captación y tratamiento de lixiviados.
- ♻️ Plano de sistema de captación de gases.
- ♻️ Planos de detalles.

# **CAPÍTULO IV: ESTUDIOS PRELIMINARES AL DISEÑO DE UN RELLENO SANITARIO**



## CAPITULO IV: ESTUDIOS PRELIMINARES AL DISEÑO DE UN RELLENO SANITARIO

### 4.1 Cálculos preliminares para el diseño de un relleno sanitario

Previo al diseño de un relleno sanitario, primeramente se deberá determinar el área requerida para la disposición final de residuos, las obras complementarias y área de amortiguamiento, en un horizonte de vida útil entre 15 a 20 años. Para realizar este cálculo, se debe disponer de la siguiente información de entrada:

-  Población actual y proyectada a 20 años
-  Producción per-cápita (Kg/Hab-día)
-  Generación total de residuos sólidos (Ton/día)

#### 4.1.1 Proyección de la población

Primeramente debe señalarse la población actual al año de diseño del proyecto. Dicha información debe estar respaldada por la fuente correspondiente, así mismo, la tasa de crecimiento inter-censal y la población en área urbana y rural (en caso que el relleno sanitario beneficie a un solo sector).

Para el cálculo de la proyección de la población, existen diferentes métodos (matemáticos, demográficos y económicos), los cuales requieren diferentes tipos de insumos de información. Para fines de la presente Guía se empleará el método matemático geométrico, cuya característica supone que la población crece a una tasa constante, lo que significa que aumenta proporcionalmente en cada período de tiempo. El crecimiento geométrico, se describe a partir de la siguiente ecuación:

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

**Dónde:**

- Pf: Población proyectada (hab)
- Po: Población año base (hab)
- r = Tasa de crecimiento %
- t = tiempo en años entre Pf y Po

En caso de no existir información respecto a la tasa de crecimiento, este indicador podría calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$r = (P_f / P_o)^{1/t} - 1$$

#### 4.1.2 Producción Per-cápita y Generación Total de Residuos Sólidos

La producción per cápita (PPC), determina la cantidad promedio de residuos sólidos que se genera por persona en un determinado periodo de tiempo. Este indicador puede calcularse aplicando la siguiente ecuación:

$$PPC = \frac{\text{Cantidad de Residuos Generados}}{\text{Población}} \left( \frac{kg}{hab - día} \right)$$

En caso de no contar con información respecto a la cantidad generada, este indicador puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$PPC = \frac{\text{Cantidad recolectada} \left( \frac{\text{Ton}}{\text{día}} \right)}{\text{Población atendida} * \text{Cobertura}(\%) * 1000} \left( \frac{\text{kg}}{\text{hab} - \text{día}} \right)$$

Para determinar la cantidad recolectada, es necesario conocer el valor de la densidad de los residuos sólidos (Kg/m<sup>3</sup>), el volumen de la tolva o caja de recolección y el número total de viajes que realiza cada vehículo en una semana de recolección (se toma como parámetro de referencia, una semana, puesto que por lo general durante ese periodo se atiende a toda la población objetivo del municipio o área del municipio).

Para fines de orientación se pueden emplear los siguientes indicadores en función a los parámetros poblacionales, sin embargo deberá complementarse con el estudio de caracterización y composición de residuos sólidos.

Cuadro 4.1: Índice de PPC domiciliario nacional, por categoría poblacional (Kg/Hab-día)		
Categoría poblacional	Población urbana	Promedio ponderado
Capital metropolitanas	Mayor a 500.000	0,53
Resto ciudades capitales	Entre 100.000 a 500.000	0,48
Mayor	Entre 100.000 a 500.000	0,46
Intermedio	Entre 10.000 a 100.000	0,45
Menor	Entre 2.000 a 10.000	0,42
Rural	Menor a 2.000	0,20
<b>Total Municipios</b>		<b>0,50</b>

Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS/Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia

### 4.1.3 Cálculo de área para relleno sanitario

El cálculo de área deberá estar proyectado a 20 años plazo. En el siguiente cuadro, se muestra un ejemplo de los datos requeridos y cálculos correspondientes:

Cuadro 4.2: Cálculo de área para disposición final de residuos sólidos municipales														
Año	Pob. (hab.)	PPC (kg /hab/día)	Cantidad de Residuos Sólidos			Volumen (m <sup>3</sup> )						Área Requerida		
			RSD (Ton/día)	RSND (Ton/día)	RSM (Ton/año)	Residuos Sólidos Compactados		Material de Cubierta		Residuos Sólidos Estabiliz. (m <sup>3</sup> /año)	Relleno Sanitario		Relleno A <sub>R</sub>	Relleno A <sub>T</sub>
						Diaria (m <sup>3</sup> )	Anual (m <sup>3</sup> )	Diaria (m <sup>3</sup> )	Anual (m <sup>3</sup> )		m <sup>3</sup>	Acum.		
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	
		(2) *(1)/1000	(3)*30% (ciudades grandes) (3) *20% (ciudades pequeñas)	(3+4)*365	(3+4) *7/6/Densidad	6*365	(6)*0,2	8*365	(5)/Densidad (Ton/m <sup>3</sup> )	(9)+(10)		(11)/H	(12)/H	

Fuente: Elaborado en base a Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales, Jaramillo, 2002

**Dónde:**

- (1) Población urbana o población del área de estudio municipal
- (2) Producción per-cápita
- (3) Generación diaria de residuos sólidos domiciliarios (RSD) comprende residuos los generados en fuente domiciliaria ( $RSU_{DOM}$ ) por la población en Toneladas
- (4) Generación diaria de residuos sólidos no domiciliarios (RSND) comprende los residuos generados en fuentes no domiciliarias (áreas públicas, mercados, comercio y otros asimilables a domiciliarios). Para el cálculo de la generación de residuos sólidos no domiciliarios, puede considerarse entre el 20 a 30% de lo generado en los domicilios, dependiendo las actividades desarrolladas en el municipio y el contexto socio económico
- (5) Generación anual de residuos sólidos municipales (RSM) comprende la suma de los residuos sólidos domiciliarios y residuos sólidos no domiciliarios es decir  $RSM = (RSD + RSND)$  por 365 días al año.
- (6) Volumen Residuos sólidos recién compactados ( $VRSM_{DC}$ ) comprende la cantidad de residuos sólidos municipales recién recolectados y dispuestos (Ton/día). En Rellenos Sanitarios Manuales, puede considerarse una densidad de  $0,3 \text{ Ton/m}^3$ ; en Rellenos Sanitarios Mecanizados una densidad de  $0,5 \text{ Ton/m}^3$ .
- (7) Volumen anual de residuos sólidos municipales compactados ( $VRSM_{AC}$ ), es decir  $VRSM_{AC} = VRSM_{DC} * 365$
- (8) Volumen diario de material para cobertura ( $VMC_D$ ), referente al material requerido para realizar la cobertura diaria en la disposición de residuos (en promedio corresponde al 20%), es decir  $VMC_D = VRSM_{DC} * 20\%$ .
- (9) Volumen anual de material para cobertura ( $VMC_A$ ), es decir  $VMC_A = VMC_D * 365$
- (10) Volumen anual de residuos sólidos municipales estabilizados ( $VRSME_A$ ), comprende la estabilización (densidad) de los residuos sólidos municipales recolectados por la acción mecánica y biológica. En rellenos sanitarios manuales, puede considerarse una densidad de  $0,5 \text{ Ton/m}^3$ ; en rellenos sanitarios mecánicos una densidad de  $0,7 \text{ Ton/día}$  a  $0,8 \text{ Ton/m}^3$ . Es decir  $VRSME_A = RSM / \text{Densidad}$
- (11) Volumen total anual requerido para disposición de residuos sólidos municipales ( $VRSMT_A$ ), comprende el volumen anual de residuos municipales estabilizados ( $VRSME_A$ ) más el volumen anual requerido de material para cobertura ( $VMC_A$ ), es decir  $VRSMT_A = VRSME_A + VMC_A$
- (12) Volumen total anual acumulado requerido para disposición de residuos sólidos municipales ( $VRSMT_A$ )
- (13) Área total anual requerida ( $A_R$ ) comprende el área a disponer, en función al volumen total anual requerido para disposición y la altura pre establecida (H), es decir  $A_R = VRSMT_A / H$ . Se debe considerar que de tratarse de método de área para el relleno sanitario esta altura será máxima de 3 metros para rellenos manuales y hasta 30 metros para rellenos mecanizados. En rellenos sanitarios manuales la profundidad dependerá del nivel de la napa freática, el tipo suelo y la estabilidad.
- (14) Área total acumulada requerida ( $A_T$ ), es decir  $A_T = VRSMT_A / H$

El Área requerida será el total de área para los años proyectados para el funcionamiento del relleno sanitario.

**Área para infraestructura auxiliar**

Tanto para rellenos manuales como mecanizados se debe incrementar al área total calculada para disposición de residuos sólidos entre un 20% a 30% adicional para infraestructura complementaria como portería, administración, talleres, báscula, piscinas de almacenaje de lixiviados y planta de tratamiento, vías de circulación y área de maniobras de los equipos y vehículos.

**4.2 Estudio de caracterización de residuos sólidos**

De forma complementaria, en caso de no existir información de generación y composición físico química de los residuos que se generan en el municipio, se deben determinar mediante estudio de caracterización; como referencia se debe consultar la Norma Boliviana NB 743.

**4.3 Residuos aceptables en un relleno sanitario municipal convencional**

Los residuos sólidos generados en fuentes domiciliarias y no domiciliarias como los comercios, instituciones de servicios, áreas públicas, establecimientos de salud (excepto radioactivos) industrias

(excepto residuos sólidos peligrosos) y fuentes especiales (residuos de mataderos, forestales y de la construcción) pueden disponerse en rellenos sanitarios municipales, previo tratamiento. De las fuentes citadas se pueden distinguir tres tipos de residuos: 1) comunes, 2) peligrosos y 3) especiales (que incluyen a los inertes).

- ♻️ Los residuos sólidos comunes, incluyen los residuos reciclables, orgánicos y no aprovechables los cuales pueden ser depositados en una misma celda previo aprovechamiento.
- ♻️ Los residuos sólidos peligrosos, dependiendo las características de peligrosidad (excepto de industrias) deben ser depositados en celdas especiales, previo tratamiento de manera de reducir sus características de peligrosidad. Requieren áreas especiales y no pueden ser mezclados con el resto de residuos.
- ♻️ Los residuos sólidos especiales, dependiendo sus características, como los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, residuos inertes, llantas y neumáticos, residuos voluminosos, residuos forestales, residuos de mataderos, residuos agrícolas, deben ser tratados previamente y aprovechados en su mayor parte, en consecuencia la fracción no aprovechable, dependiendo sus características podrá ser dispuesta en celdas de residuos comunes o peligrosos. Los residuos inertes requieren celdas o áreas especiales. Los residuos de mataderos en su mayor parte deben estar destinados al compostaje o lombricompostaje.
- ♻️ Los residuos peligrosos generados de procesos industriales de manufactura, hidrocarbúricos, mineros-metalúrgicos, eléctricos, agro industriales, requieren de rellenos sanitarios especialmente diseñados.

Las consideraciones de aceptabilidad de los residuos sólidos deben incluir, las cantidades y características físicas y químicas de los residuos sólidos, los métodos alternativos para su tratamiento y disposición; los riesgos y efectos de los residuos sólidos para el ambiente y la salud; y sobre todo la seguridad del personal operativo.

Los residuos de establecimientos de salud y los residuos de lodos de aguas residuales que no han recibido tratamiento previo califican también como inaceptables por razones de concentración y grado de peligro.

En el siguiente cuadro se detalla los tipos de residuos que se pueden disponer en un relleno sanitario convencional.

**Cuadro 4.3: Tipo de residuos que se pueden disponer en un relleno sanitario municipal**

Clasificación	Tipo de Residuo	Celda comunes		Celda Peligrosos		Sistemas de tratamiento y/o Aprovechamiento	
		Si	No	Si	No	Si	No
<b>Residuos comunes(1)</b>	Residuos domiciliarios	X	-	-	-	X	-
	Residuos comerciales	X	-	-	-	X	-
	Residuos institucionales	X	-	-	-	X	-
	Residuos de los servicios de barrido y limpieza	X	-	-	-	-	X
	Residuos de mantenimiento de áreas verdes	X	-	-	-	X	-
	Residuos asimilables de establecimientos de salud	X	-	-	-	-	X
	Residuos industriales asimilables a comunes	X	-	-	-	X	-

**Cuadro 4.3: Tipo de residuos que se pueden disponer en un relleno sanitario municipal**

Clasificación	Tipo de Residuo	Celda comunes		Celda Peligrosos		Sistemas de tratamiento y/o Aprovechamiento	
		Si	No	Si	No	Si	No
	Otros residuos asimilables a comunes	X	-	-	-	X	-
Residuos especiales	Vehículos	-	X	-	-	X	-
	Residuos voluminosos de muebles	-	X	-	-	X	-
	Residuos de metal voluminosos	-	X	-	-	X	-
	Residuos eléctricos y electrónicos	-	X	X	-	X	-
	Llantas y neumáticos	X	-	-	-	X	-
	Restos de matadero	-	X	-	-	X	-
	Animales muertos	-	X	X	-	X	-
	Lodos de tratamiento y limpieza de drenajes pluviales	-	X	X	-	X	-
	Residuos forestales	-	X	-	-	X	-
	Residuos de la construcción y demolición	-	X	-	-	X	-
Residuos peligrosos	Residuos peligrosos municipales	-	X	X	-	X	-
	Residuos de servicios de mantenimiento de maquinaria y vehículos	-	X	X	-	X	-
	Lodos de tratamiento y limpieza de drenajes pluviales (sin tratar)	-	X	X	-	X	-

(1) En el máximo de los esfuerzos deberían llegar a la disposición final sólo de los residuos no aprovechables  
**Fuente:** MMAyA/VAPSB/DGGIRS

## 4.4 Estudios de Campo y Diseño

Para realizar el diseño de un relleno sanitario, se deberán contar con los siguientes estudios y análisis

### 4.4.1 Estudio topográfico

Es el estudio que permite describir las características de los diferentes perfiles de terreno a fin de clasificarlo según su pendiente, identificar el sector apropiado para relleno y para material de cobertura y para facilitar la definición del método de disposición a utilizarse; el estudio concluye en un plano con curvas de nivel en escala adecuada para el diseño de detalle y con información anexa como: memoria descriptiva, planos de ubicación, entre otros

Para los fines de construcción y operación de un relleno sanitario, un terreno por su topografía se puede clasificar en:

- 🌿 Plano.- Es aquel terreno en el que se presentan pequeñas pendientes como las mesetas y llanuras (0 a 3% de pendientes).
- 🌿 Ondulado.- Se consideran terrenos, ondulados aquellos en los que la pendiente no es continua presentando partes planas y partes con pendiente media como son los valles (3 a 12% de pendiente).
- 🌿 Escarpado.- Presentan una pendiente muy fuerte (mayores del 12%) como montañas, cerros, cañadas, etc.
- 🌿 Hondonada o depresión.- Es aquel terreno que presenta grandes oquedades u hoyos que puedan ir desde 5 m a 15 m de profundidad.
- 🌿 Combinado.- Es aquel que presenta 2 ó más variantes de los terrenos arriba descritos.

#### a) Curvas de nivel

Una curva de nivel es aquella línea que en un mapa une todos los puntos que tienen igualdad de condiciones y de altura. Permite determinar la cota o elevación de cualquier punto del terreno, trazar perfiles, calcular pendientes, resaltar las formas y accidentes del terreno, etc. El trazo de curvas de nivel se hará de acuerdo a los siguientes lineamientos:

- ♻️ A cada 0,50 m para sitios planos, hondonadas naturales y terrenos ligeramente sinuosos.
- ♻️ A cada 1,00 m para sitios sinuosos, hondonadas profundas y valles escarpados.

## b) Planimetría

La planimetría es la parte de la topografía que estudia el conjunto de métodos y procedimientos que tienden a conseguir la representación a escala de todos los detalles del terreno sobre una superficie plana, prescindiendo de su relieve y la altitud, de manera de lograr una representación en dirección horizontal. Puede determinarse a partir de un solo punto conocido, por levantamiento de poligonales<sup>15</sup>, un método que consiste en medir distancias horizontales y azimut a lo largo de una línea quebrada.

Puede representarse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{Tolerancia angular} &= 1 - \sqrt{N} \\ \text{Tolerancia lineal} &= 1/5.000 \end{aligned}$$

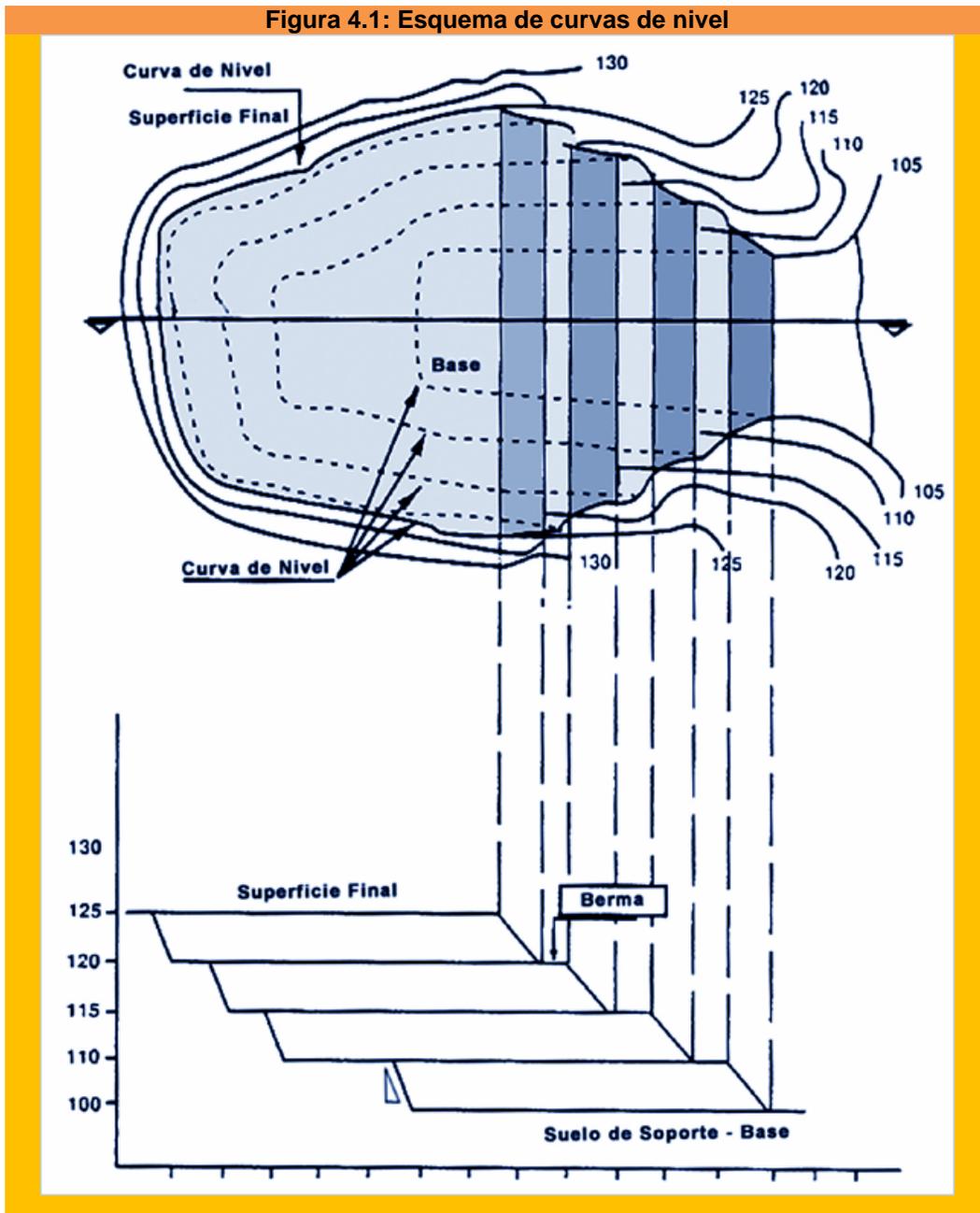
**Dónde:** N es el número de vértices de la poligonal

- ✓ Todos los puntos en sus vértices, deberán estar referenciados a bancos de nivel fijos y de ser posibles oficiales, con objeto de rehacer la poligonal cuantas veces se requiera.
- ✓ La poligonal del terreno deberá estar referida a un sistema de coordenadas.
- ✓ La poligonal del terreno en cada uno de sus vértices deberá contar con ángulos internos, rumbos y azimut.

---

<sup>15</sup> Una poligonal es una serie de líneas rectas que conectan estaciones poligonales, que son puntos establecidos en el itinerario de un levantamiento. Una poligonal sigue un recorrido en zigzag, lo cual quiere decir que cambia de dirección en cada estación de la poligonal. Existen dos tipos de poligonales: cerradas y abiertas. En planimetría no se consideraba la forma real del terreno, ya que solo se consideraba la proyección de la superficie sobre el plano horizontal

Figura 4.1: Esquema de curvas de nivel



Fuente: Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales, 2002

### c) Altimetría

Es la parte de la topografía que se encarga a medir las alturas, estudia los métodos y técnicas para la representación del relieve del terreno así como para determinar y representar la altura; también llamada "cota", de cada uno de los puntos, respecto de un plano de referencia.

El instrumento más importante en la materia es el Nivel, instrumento empleado en la nivelación por alturas, consiste en la determinación de la altura de los puntos del terreno, (en realidad de sus puntos característicos), sobre una superficie del nivel que se toma como superficie de comparación de nivel; esta superficie se puede elegir arbitrariamente y puede ser cualquiera

con la única condición de que todos los puntos de la superficie del terreno considerado, estén situadas por encima de ellos.

Los métodos altimétricos, llamados también métodos de nivelación, tienen como finalidad la determinación del desnivel entre dos o más puntos.

#### d) Escala

Es la relación matemática que existe entre las dimensiones reales y las del dibujo que representa la realidad sobre un plano o un mapa. Se puede representar gráficamente (ej.: 0\_\_\_\_10 Km), numéricamente (ej.: 1:1) y por unidad (1 cm = 4 Km).

La escala numérica, representa la relación entre el valor de la representación (el número a la izquierda del símbolo ":") y el valor de la realidad (el número a la derecha del símbolo ":"). Un ejemplo de ello sería 1:100.000, lo que indica que una unidad cualquiera en el plano representa 100.000 de esas mismas unidades en la realidad, dicho de otro modo, dos puntos que en el plano se encuentren a 1 cm estarán en la realidad a 100.000 cm, si están en el plano a 1 metro en la realidad estarán a 100.000 metros, y así con cualquier unidad que se tome.

La fórmula es:

$$N = P / T$$

Dónde:

N: Escala

P: Dimensiones en el papel (cm, m)

T: Dimensiones en el terreno (cm, m)

Ambos deben estar en una misma unidad de medida.

El primer número representa la unidad y el segundo las veces en que esta se ha dividido para generar dimensiones proporcionales más pequeñas.

#### Ejemplos

Escala	Cada metro en el campo es igual a	=	En el plano es
1:20	1/20	0,05	5 cm
1:50	1/50	0,02	2 cm
1:100	1/100	0,01	1 cm

Respecto al plano de rellenos sanitarios, se recomienda dibujar tomando en consideración las siguientes escalas:

- ✓ Terrenos hasta de 8 hectáreas, Escala 1:500.
- ✓ Terrenos mayores de 8 hectáreas, Escala 1:1000

En el mismo plano se ponen los datos obtenidos del levantamiento de campo.

#### e) Información anexada al estudio topográfico

Todo informe topográfico deberá anexar información y los planos respectivos propios del área levantada. En ese sentido se recomienda, que el estudio topográfico presente los siguientes resultados:

- I. Memoria descriptiva del levantamiento topográfico de la zona elegida para la disposición final de los residuos sólidos municipales, para identificar las dificultades en cuanto a la accesibilidad al terreno.
- II. Plano de ubicación: Este plano además deberá incluir las vías de acceso al área elegida, cercanía con centros poblados cercanos, actividades humanas próximas y/o áreas de interés para el proyecto de relleno sanitario.
- III. Plano topográfico: En el que se deberá incluir una ficha de datos técnicos conteniendo Coordenadas UTM de los vértices del área en Datum WGS 84.

Plano perimétrico: Conteniendo el cuadro de datos técnicos con la siguiente información:

- I. Medida de los ángulos interiores de todos los vértices del polígono.
- II. Lados del polígono debidamente acotados.
- III. Área del polígono.

Cuadro 4.4: Reporte de Datos Técnicos					
Vértice	Lado	Distancia	Ang. Interno	Este (X)	Norte (Y)
L 1	1-2				
L i	2-i				
Área			(Has)		
Perímetro			(ml)		
Centroide		Este (X) Norte (Y)			

Fuente: Adaptado de Guía para el Diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de relleno sanitario mecanizado

#### 4.4.2 Estudio Geotécnico

La geotecnia es la técnica que se dedica al estudio de las propiedades de suelos, rocas y materiales artificiales, así como a la resolución de problemas de fundaciones y/o excavaciones en ellos para su empleo como material de construcción (presas, terraplenes, vías de comunicación, etc.). El objetivo es conocer el comportamiento mecánico del suelo en el que va a construirse el relleno, su resistencia, elasticidad, etc., mediante los resultados de los análisis de laboratorio.

##### a) Suelo

El suelo surge de la modificación y alteración de las rocas y minerales, constituyentes del material madre o material original del suelo, llegando a cubrir como un “manto” toda la superficie terrestre. La alteración de ese material madre, por los agentes de meteorización o alteración (viento, agua, hielo, temperatura etc.) y luego la acción de las plantas y animales y de los microorganismos y sus productos de descomposición, se conoce como “proceso natural de formación de los suelos”.

##### b) Textura del Suelo

La textura del suelo es la proporción de cada elemento en el suelo, representada por el porcentaje de arena, arcilla, y limo. La textura del suelo depende de la naturaleza de la roca madre y de los procesos de evolución del suelo, siendo el resultado de la acción e intensidad de los factores de formación del suelo.

Se considera que un suelo presenta buena textura, cuando la proporción de los elementos que los constituyen, brinda a la planta la posibilidad de ser un soporte que permita un buen desarrollo radicular y brinde un adecuado nivel de nutrientes.

Se puede representar gráficamente mediante el diagrama textural. Un diagrama textural es un gráfico en forma de triángulo equilátero sobre cada uno de cuyos lados se representa el porcentaje de arena, limo y arcilla. De este modo es posible relacionar gráficamente diversas muestras de suelo.

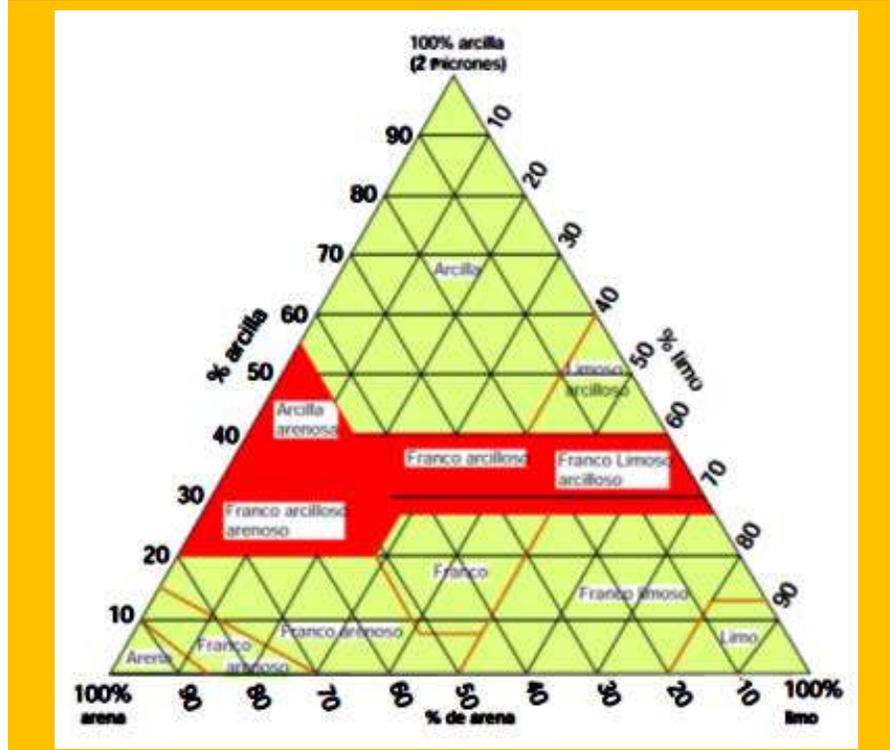
Las partículas agrupadas en cada clase textural poseen características semejantes.

Desde un punto de vista práctico, los suelos pueden agruparse en tres tipos distintos, según la clase textural predominante:

- 1) Suelos pesados (arcillosos)
- 2) Suelos medios
- 3) Suelos ligeros (arenosos).

Por otro lado, los suelos que poseen una composición equilibrada de arena, limo y arcilla se conocen como suelos francos.

**Figura 4.2: Diagrama Triangular para la Clasificación de Suelos por Texturas**



Fuente: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, México, 1984

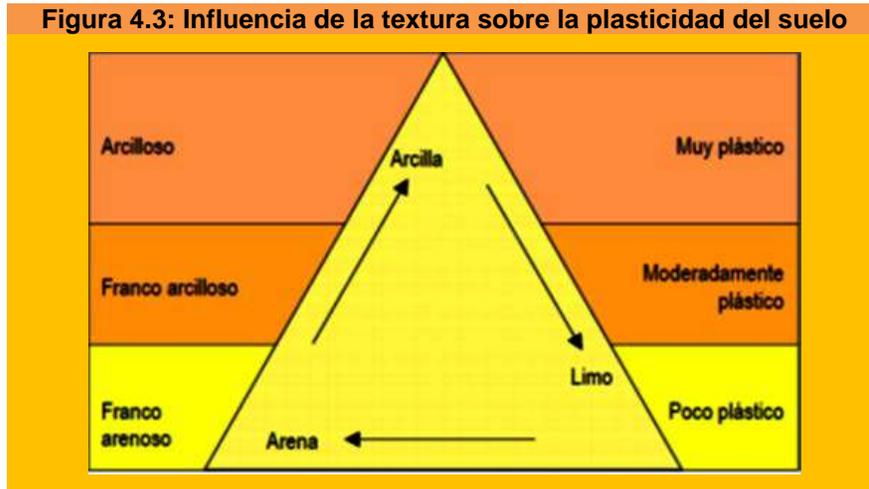
### c) Influencia sobre las propiedades del suelo

Desde el punto de vista genético, la textura del suelo es una consecuencia de la actuación de los factores formadores:

- 1) Cada tipo de litología tiende a originar un determinado tipo de clase textural que hereda el suelo en sus primeros estados de desarrollo.
- 2) El clima puede modificar la textura del suelo o de sus horizontes a través de los procesos de lavado y alteración química. De este modo, la meteorización intensa del suelo origina texturas arcillosas. En climas áridos, la textura del suelo es generalmente más gruesa.
- 3) El relieve influye sobre el transporte de partículas de la superficie del suelo, favoreciendo el transporte de las partículas más finas. En la parte alta de las laderas, donde predominan los procesos de arrastre, el suelo va empobreciéndose progresivamente en partículas finas. Estas partículas finas, junto a otros componentes del suelo como la materia orgánica pueden depositarse en el valle, cuando la velocidad de la corriente superficial es más baja.

- 4) La edad del suelo condiciona también su textura, ya que a igualdad de condiciones, los suelos más antiguos han sufrido una mayor alteración química del material original y un lavado más intenso.

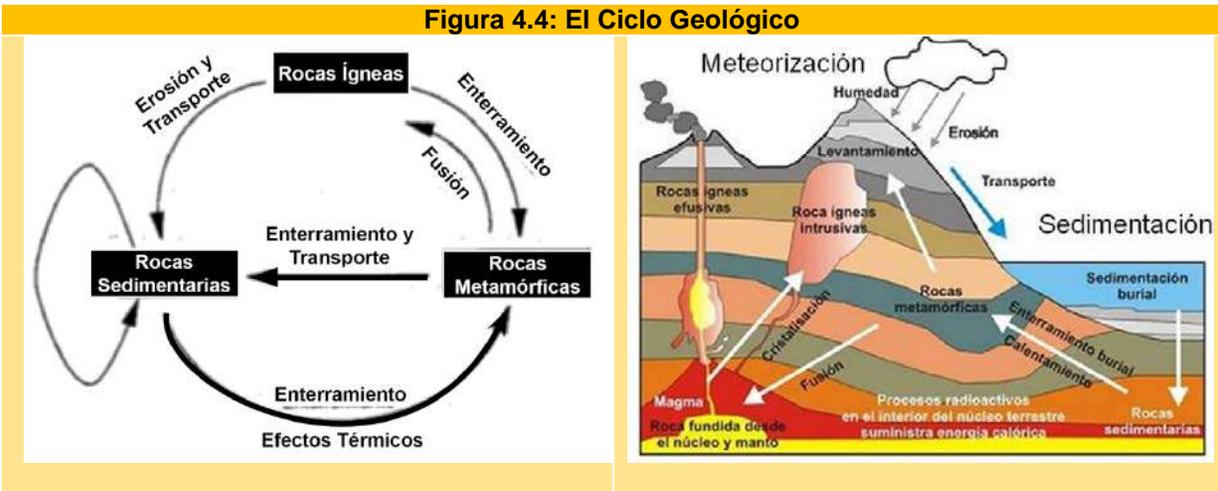
Por otra parte, la composición granulométrica del suelo condiciona la mayoría de las propiedades físicas y químicas del suelo. Desde el punto de vista físico, la textura condiciona la estructura, el color, la consistencia, la porosidad, el intercambio de fluidos (aireación y permeabilidad), el grado de hidromorfía<sup>16</sup> y la retención de agua o los procesos de lavado.



Fuente: Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecología, México, 1984

#### d) Tipos de roca

Las rocas presentes en la superficie de la tierra y los suelos que provienen de ellas, pueden subdividirse en tres tipos; cada uno corresponde a su propia modalidad de formación y se vinculan a través del ciclo geológico:



Fuente: Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecología, México, 1984; <http://geologiavenezolana.blogspot.com/>

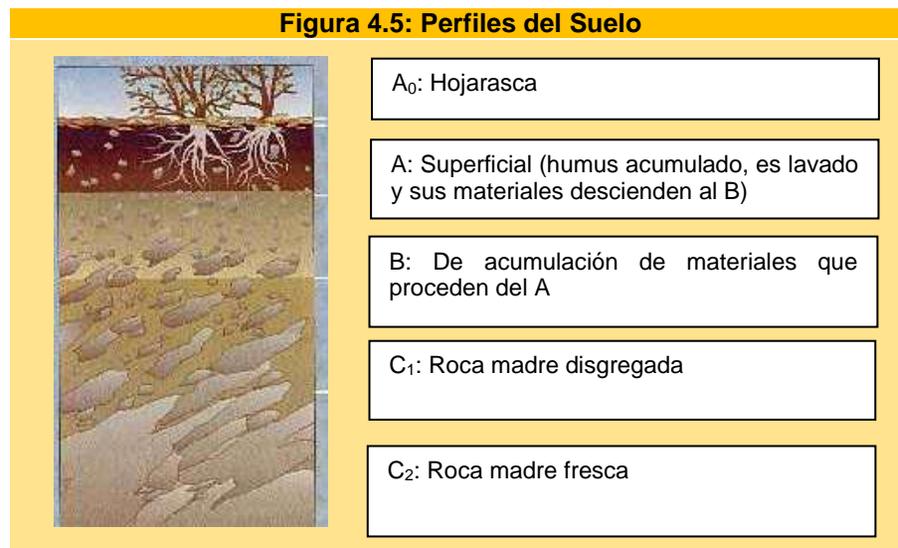
<sup>16</sup> Se entiende por hidromorfía a un estado permanente o temporal de saturación de agua en el suelo que lleva asociado la existencia de condiciones reductoras.

- 1) **Sedimentarias:** Las rocas sedimentarias se derivan principalmente de la destrucción (erosión o disolución química) de las rocas existentes, y su transporte y deposición en capas en el fondo de los mares, lagos y ríos. La sedimentación también puede presentarse directamente en la superficie como en el caso de las areniscas eólicas. Las rocas y los suelos sedimentarios incluyen conglomerados, areniscas, piedras caliza, tiza, arcilla y otros.
- 2) **Volcánicas:** Las rocas volcánicas o ígneas se forman a través del surgimiento y enfriamiento del magma derretido en la superficie de la tierra. La composición original del magma derretido determinará las características finales de las rocas enfriadas y su resistencia al clima y su fracturación. El magma de movimiento rápido más fresco y espeso no se mueve tan fácilmente y se detiene debajo de la superficie, donde forma rocas más gruesas. Estas rocas son expuestas a la superficie mediante la erosión, formándose los granitos.
- 3) **Metamórficas:** Las rocas metamórficas son el resultado de la transformación de las rocas existentes (volcánicas o sedimentarias) mediante el calentamiento o la presión. El calor y la presión aplicados a las rocas resultan del enterramiento de sedimentos en la profundidad de la corteza, de la deformación durante el desarrollo de cadenas montañosas o de la proximidad de rocas volcánicas.

#### e) Perfil del Suelo

Las partículas del suelo se distribuyen en cuatro capas a distintos niveles de profundidad denominadas "Horizontes" y se designan con las letras A, B, C y R, al conjunto se denomina perfil del suelo.

- ♻️ Horizonte A: Es la primera capa y en ella se acumula la materia orgánica y se forma el Humus.
- ♻️ Horizonte B: Es fundamentalmente de origen Mineral, sin embargo también se encuentran sustancias orgánicas.
- ♻️ Horizonte C: Está formado por el resto de roca fragmentaria proveniente de la disgregación física de la Roca Madre.
- ♻️ Horizonte R: Es la capa más profunda y está formada por la roca madre, que da origen a los demás horizontes.



Fuente: Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente <<http://www.tecnun.es>>

#### 4.4.2.1 Muestreo de Suelos

Para determinar las propiedades físicas, mecánicas, hidráulicas y características de suelos, es necesario realizar un estudio de mecánica de suelos. Para lograr resultados razonables en el laboratorio, es necesario realizar en forma adecuada la obtención de las muestras de suelo. Existen varios procedimientos para efectuar la obtención de muestras, los más recomendables son: 1) Método de Pozos a Cielo Abierto, con muestreo alterado o inalterado, 2) Método de Penetración Estándar.

La Norma Boliviana NB 760, establece que para definir la estratigrafía del sitio, se deberá realizar un sondeo por cada cuatro hectáreas, con una profundidad mínima de de 10 m por debajo de la cota inferior del relleno sanitario o hasta llegar a un estrato de material consolidado impermeable.

##### a) Método de pozos a cielo abierto

El método de calicatas a cielo abierto, consiste en excavar una calicata de dimensiones suficientes para que un técnico pueda directamente bajar y examinar los diferentes estratos del suelo en su estado natural y obtener así, muestras de ellos. La profundidad máxima de las calicatas es de 3m. El muestreo puede ser compuesto o individual.

🔄 **Muestras compuestas**, la toma de una muestra compuesta se realiza de manera integrada de cada una de las calicatas, las cuales se localizan una por cada hectárea del sitio a estudiar. El procedimiento para la obtención de la muestra en cada pozo excavado consiste en abrir una ranura vertical de aproximadamente 20 cm de profundidad, desde la superficie hasta el fondo de la excavación. El material obtenido se coloca en un recipiente previamente identificado (lugar, fecha, número de pozo y profundidad del mismo); el cual deberá de proteger a la muestra de pérdidas de humedad.

🔄 **Muestra individual o inalterada por niveles**, se recomienda tomar por lo menos una muestra inalterada del sitio, por capas, que por lo general es el centro del sitio elegido como posible banco de material. La finalidad de la muestra inalterada es conservar las condiciones del suelo en su estado natural, por lo que se requiere de cuidados especiales para su obtención, empaque y transporte.

El procedimiento para la obtención de la muestra consiste en limpiar y nivelar el terreno, luego se introduce un tubo muestrea por a un costado de la pared de la calicata hasta el nivel de suelo que se quiere muestrear, hasta donde la resistencia del terreno lo permita. Posteriormente, se recorta la muestra de suelo por su base y se enrasa al tamaño del tubo, procediéndose a envasar de acuerdo a normas internacionales de muestreo y se envía para su análisis a laboratorio.

##### b) Método de penetración estándar

Se recomienda utilizar este método cuando se desea conocer las características del subsuelo a una profundidad mayor de 3 m. Consiste en penetrar a golpes un muestreador especial llamado penetrómetro, por medio de un martinete que cae desde una altura dada, contando el número de golpes necesarios para lograr una penetración de 30 cm. (1 pie). El penetrómetro es hueco y de media caña, lo que facilita la extracción de la muestra de suelo que haya penetrado en su interior. Este muestreador debe retirarse en cada avance de 60 cm., para tomar la muestra correspondiente a la profundidad.

#### 4.4.2.2 Análisis de Suelos

Una vez obtenidas las muestras de suelo, se podrán realizar los siguientes análisis: 1) Granulometría 2) Compactación, 3) Permeabilidad, 4) Humedad Natural y Peso Volumétrico.

### 1) Granulometría

El análisis consiste en separar y clasificar por tamaños el material del suelo, para determinar el diámetro efectivo de las partículas, así como para saber si están bien o mal graduadas; es decir, si existen o no partículas de diferente tamaño; ésto mediante la obtención del coeficiente de uniformidad del suelo.

Los resultados pueden representarse mediante una curva granulométrica, que indica gráficamente el porcentaje acumulado en peso de las partículas que componen el suelo.

### 2) Compactación

El análisis de compactación tiene la finalidad de aumentar la densidad del suelo mediante la aplicación de una carga, disminuyendo con esto la porosidad. Para elegir el material de cubierta se deberá compactar en el laboratorio una muestra del suelo para obtener la humedad óptima de compactación, que es aquella con la que se logra, al ser compactado, la máxima densidad; es decir con la que se obtiene la menor relación de vacíos. Posteriormente debe determinarse la permeabilidad de la muestra compactada para determinar su nuevo coeficiente de permeabilidad.

Ya en obra, el suelo se compactará por capas de un espesor y una humedad óptima establecida por los resultados obtenidos en el laboratorio.

### 3) Permeabilidad

La permeabilidad de un suelo es la resistencia que presenta al paso de agua a través de él. Esta permeabilidad se encuentra en función directa con la porosidad del suelo; su determinación se expresa mediante un coeficiente de permeabilidad y se obtiene con la siguiente ecuación:

$$K = \frac{Q}{A(\Delta h / \Delta l)}$$

Dónde:

K= coeficiente de permeabilidad en cm/s

Q= caudal o flujo en cm<sup>3</sup>/s

A= área en cm<sup>2</sup>

$\Delta h / \Delta l$  = pendiente hidráulica en milésimas.

Cuadro 4.5: Coeficiente de permeabilidad k (cm./s)(Escala logarítmica)												
K (cm/s)	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	10	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>
Drenaje	Bueno						Franca a Pobre		Prácticamente impermeable			
Relleno Sanitario	Malo								Bueno			
Tipo de suelo	Grava Gruesa		Arena limpia arena mezclada con grava		Arena muy fina, suelos orgánicos e inorgánicos, mezcla de limo arenoso y arcilla				Suelo impermeable modificado por efecto de la vegetación y la intemperización			
Tipo de suelo					Suelo impermeable; por ejemplo: Arcilla homogénea debajo de la zona de intemperización.							

Fuente: Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales, Jaramillo, 2002

#### 4) Humedad natural

Este análisis consiste en determinar la cantidad de agua que tiene el suelo en su estado natural. Se determina mediante la relación entre el peso del agua contenida en el suelo y, el peso de su fase sólida. Se expresa como un porcentaje, con la siguiente fórmula:

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Dónde:

w (%) = humedad del suelo  
 W<sub>w</sub> = peso del agua.  
 W<sub>s</sub> = peso de la fase sólida.

#### 5) Peso volumétrico

El peso volumétrico de un suelo se define como el peso total de la masa del suelo (peso de los sólidos más el peso del agua) dividido entre el volumen total de la muestra de suelo (volumen de la masa), es decir:

$$P_v = \frac{W_m}{V_m}$$

Dónde:

P<sub>v</sub> = Peso volumétrico en Kg/m<sup>3</sup>  
 W<sub>m</sub> = Peso de la masa del suelo en Kg  
 V<sub>m</sub> = Volumen de la muestra en m<sup>3</sup>

#### 4.4.2.3 Determinación de la Textura

A la hora de evaluar la textura del suelo es necesario tener en cuenta la distribución textural de los horizontes del perfil. No es lo mismo una textura similar en todo el perfil que la existencia de distintos horizontes con distintas texturas que incidan de manera particular en los procesos edáficos.

##### a) Ensayo al tacto

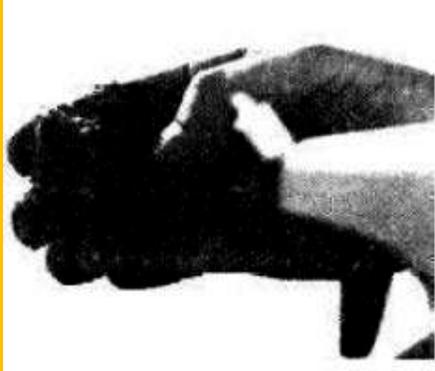
El método de determinación de la textura mediante el ensayo al tacto plantea numerosas ventajas por su facilidad para llevarlo a cabo en campo o en laboratorio, así como por su rapidez. Sin embargo, es un método en el que se requiere experiencia práctica y que debe tomarse en cuenta como complementario.

Los distintos métodos de ensayo al tacto se basan en el comportamiento del material edáfico en estado seco o en húmedo, y en su grado de plasticidad o adherencia. De esta forma es posible diferenciar de una forma más o menos precisa entre diferentes tipos de texturas.

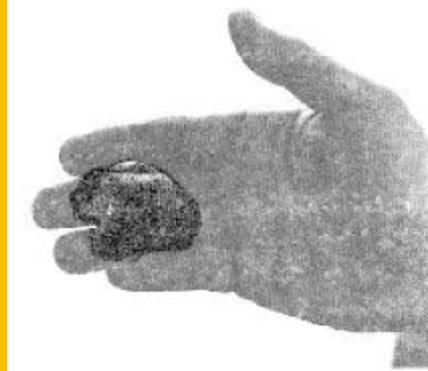
La muestra se humedece y amasa entre los dedos hasta formar una pasta homogénea. Posteriormente se toma entre el dedo índice y pulgar y se presiona sobre éste último tratando de que se forme una cinta en la cual se observará la presencia de brillo, si la cinta es lisa o escamosa, si el tacto es áspero.

- ♻ Si la muestra es arenosa: el tacto es áspero y abrasivo, no tiene brillo ni cohesión, no se forma cinta.
- ♻ Si la muestra es limosa: tiene tacto suave, se forma una cinta escamosa y no presenta ni pegajosidad ni plasticidad.
- ♻ Si la muestra es arcillosa: la cinta que se forma tiene cohesión, es brillante, y es plástica o pegajosa según el contenido de humedad.
- ♻ Una vez determinado el porcentaje de cada componente se entra al triangulo textural y se determina la clase a la cual pertenece el suelo.

**Figura 4.6: Preparación de la muestra**



**Humedecimiento de la muestra**



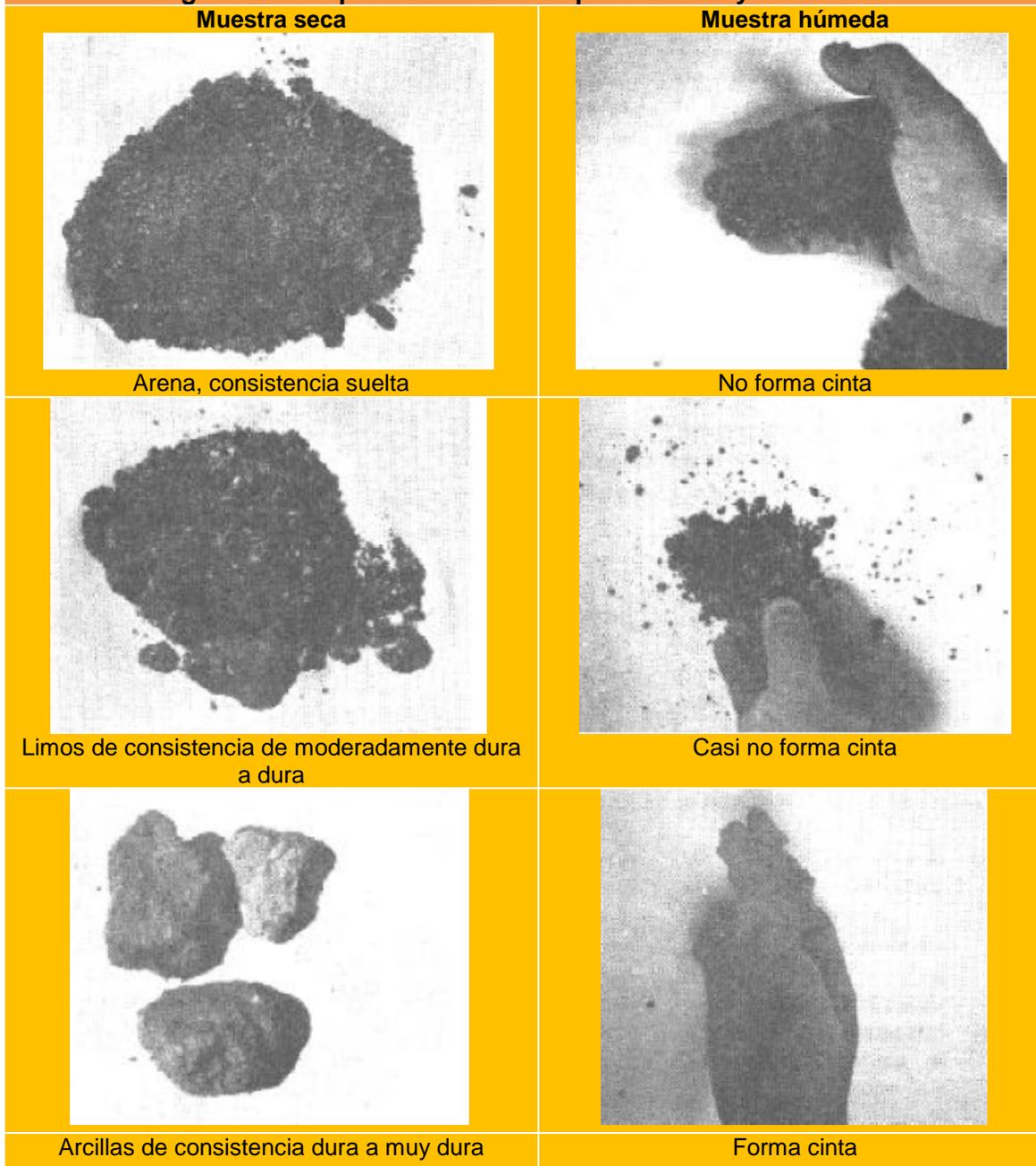
**Moldeo**



**Moldeo**

**Fuente:** Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales

**Figura 4.7: Preparación del suelo para un ensayo de textura**



**Fuente:** Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales, Jaramillo, 2002

### b) Análisis mecánico

El análisis mecánico del suelo consiste en determinar la distribución de partículas del suelo según su tamaño. Existen diversas técnicas para determinar el porcentaje correspondiente a cada clase.

Generalmente, se requiere la dispersión previa del suelo en agua utilizando un detergente. El detergente más habitual es el  $\text{Na}_2(\text{Na}_4\text{P}_6\text{O}_{18})$  (hexametáfosfato sódico).

Estos métodos se basan en la distinta velocidad de sedimentación de las partículas del suelo según su tamaño, de acuerdo con la ley de Stokes:

$$mg = \rho \cdot \left(\frac{4}{3}\right) \cdot \pi r^2$$

Donde  $m$  es el peso de la partícula,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\rho$  es la densidad de las partículas y  $r$  su radio.

#### 4.4.2.4 Localización de Bancos de Préstamo

Con base en el estudio geológico regional, se ubicarán bancos potenciales de préstamo para la construcción del revestimiento del fondo, taludes y las cubiertas intermedias y final del relleno sanitario.

#### 4.4.3 Estudio Geológico

El estudio geológico se realiza con el objeto 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.

Se deberá definir de manera precisa, la estratigrafía del sitio. Para ello se realizará un sondeo por cada cuatro hectáreas, con una profundidad mínima de 10 m por debajo de la cota inferior del relleno sanitario o hasta llegar a un estrato de material consolidado impermeable.

Los terrenos identificados no deberán estar ubicados sobre o cerca de fallas geológicas ni en zonas con riesgos de estabilidad ni deben tener la posibilidad de ocurrencia de inundación por acumulación de aguas pluviales o avenidas.

Los planos geológicos serán a escala suficiente y deberán incluir información en planta y en profundidad presentando diferentes cortes geológicos del área a ser implementada.

#### 4.4.4 Estudio hidrogeológico

Uno de los factores básicos para la selección de área es evitar que pueda haber alguna contaminación de los acuíferos, por eso es muy importante realizar un estudio hidrogeológico para conocer la profundidad a la que se encuentra el nivel freático del agua subterránea, así como la dirección y velocidad del escurrimiento o flujo de la misma.

El objetivo principal del estudio hidrogeológico es la localización de los mantos acuíferos, así como la información de escurrimiento, la velocidad, dirección de movimiento y los cortes estratigráficos de los suelos, de tal manera que se cuente con información acerca de la disponibilidad de tierra para cobertura y sus características geológicas, las cuales ayudarán a conocer el volumen disponible de material de cubierta y la línea de máxima excavación en la operación del relleno sanitario.

El estudio hidrogeológico parte del estudio geológico y comprende la realización de:

-  **Estudios geofísicos.** Previo a la ubicación de piezómetros o pozos de monitoreo pueden llevarse a cabo estudios geofísicos que nos permitirán tener información de las características del suelo en profundidad y que suelen ser más económicos que la perforación de sondeos. Existen varios métodos geofísicos, aunque por simplicidad normalmente, en el caso de los datos requeridos para la ubicación de rellenos sanitarios se usan los sondeos eléctricos verticales.
-  **Un mapa piezométrico de las aguas subterráneas.** Este mapa nos indica la dirección del flujo de agua subterráneas y se realiza mediante la ubicación y lecturas de nivel de agua en

piezómetros o pozos de monitoreo; también pueden usarse como puntos de medición, pozos de abastecimiento que puedan estar cerca del área.

Con la información resultante de estos estudios, se podrán conocer aspectos importantes para el diseño del relleno sanitario como el tipo y características de los materiales geológicos en la base del relleno, la profundidad de las aguas subterráneas y la dirección del flujo de estas.

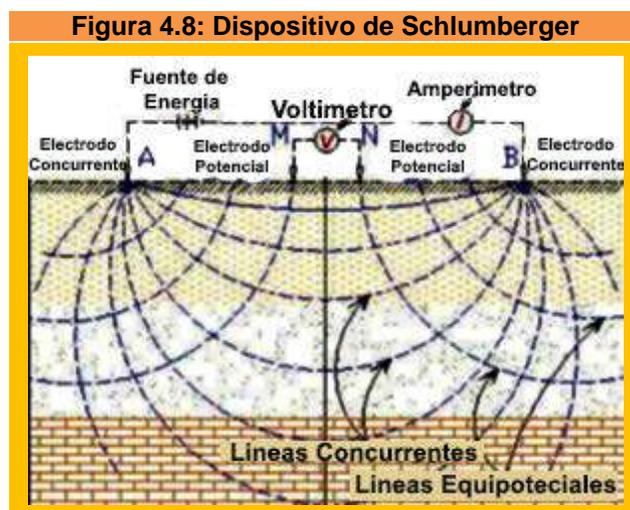
#### 4.4.4.1 Estudio Geofísico, Sondeo Eléctrico Vertical<sup>17</sup>

El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) consiste en determinar la resistividad del subsuelo a diferentes profundidades, para así inferir la composición litológica del mismo y/o el tipo de fluidos que contiene.

El método de SEV presenta los cambios de resistividad de las rocas en profundidad bajo el centro de medición en un mismo punto. El dispositivo más utilizado es de tipo Schlumberger<sup>18</sup>, el cual consiste de un arreglo de cuatro electrodos. Al efecto se utiliza una fuente externa para generar corriente que se introduce al subsuelo a través de los electrodos A y B, esta corriente genera un campo de potenciales, la diferencia de potenciales se mide entre los electrodos M y N. La profundidad investigada está relacionada con la distancia de los electrodos A y B. La lectura de corriente (I) y la diferencia de potenciales ( $\Delta P$ ) permiten calcular la resistencia (R).

Considerando el dispositivo Schlumberger, los Sondeos Eléctricos Verticales SEV's se pueden clasificar en función de la separación final entre A y B de la siguiente manera:

Cuadro 4.6: Tipos de Sondeos Eléctricos Verticales		
Tipo de SEV	Longitud	Principal Aplicación
Corto	AB hasta 250 m	Geotecnia y Arqueología
Normal	250 m < AB < 2500 m	Hidrogeología
Largo	2500 m < AB < 25000 m	Prospección petrolera
Muy Largo	Hasta 1200 Km	Investigación geofísica



Según la ley de Ohm:

<sup>17</sup> Adaptado de Informe III, Planes de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos, Ingeniería Básica, Evaluación de Impacto Ambiental, BID, Consorcio de Gestión Integral, 2012

<sup>18</sup> Es un dispositivo simétrico que debe cumplir con la condición de que la distancia que separa a AB debe ser mayor o igual que 5MN

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

Dónde:

R= Resistencia

$\Delta V$ = Diferencia de potenciales

I = Lectura de corriente

Para un medio homogéneo, la resistividad ( $\rho$ ) se obtiene al multiplicar la resistencia (R) por un coeficiente geométrico (K).

$$\rho = KR$$

Para el dispositivo Schlumberger, este coeficiente se calcula así:

$$K = \pi \frac{\left(\frac{AB}{2}\right)^2 - \left(\frac{MN}{2}\right)^2}{MN}$$

Luego:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

El valor de resistividad obtenido, para una distancia determinada entre electrodos de corriente, en un medio estratificado de una secuencia de capas que tienen diferente litología, está influenciado por los distintos horizontes atravesados por el flujo de corriente, por lo tanto se obtienen valores de resistividad aparente contra la distancia de AB/2.

En el siguiente cuadro se muestran el número de sondeos a realizar por superficie de área:

Cuadro 4.7: Número de Sondeos por Área	
Hectáreas	Número de sondeos
1-4	3
4-9	5
9-15	7
15-21	10
21-50	12
Más de 50	20

**Fuente:** Guía de diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de rellenos sanitario mecanizado, Sandoval L, Perú

Para una mayor separación de los electrodos, será también mayor la profundidad de investigación. Según la teoría del método, para que un sondeo geoelectrico sea aplicable y se obtenga resultados representativos, debe cumplirse con los siguientes requisitos:

- ♻ Las capas de sedimentos deben ser horizontales o muy poco inclinadas.
- ♻ La extensión lateral de las capas debe ser grande en comparación a la separación de electrodos.
- ♻ Capas eléctricamente diferentes, con una composición homogénea e isotropa tanto en dirección horizontal como vertical.

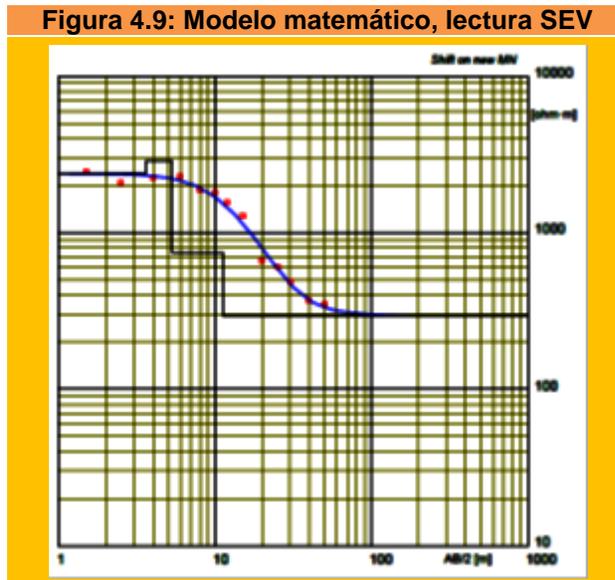
**a) Toma de datos**

La exploración geofísica, puede realizarse con un número variable de sondeos eléctricos verticales (SEV) (Ver cuadro 4.7), con distancias máximas entre electrodos AB/2 entre 100 a 250 m. La localización de los puntos se realiza por medio de GPS (Global Position System). Los datos pueden registrarse de la siguiente forma:

SEV No	Coordenadas	Cota (msnm)	AB/2 (m)	Unidad Geológica

**b) Interpretación de datos**

Las curvas obtenidas en campo son sometidas al proceso de ajuste de los empalmes presentados al variar la distancia MN, luego se leen los nuevos valores de resistividad aparente definidos y se llevan a una hoja de cálculo, la cual a su vez es insertada en el programa de interpretación empleado para el presente estudio. Para cada sondeo se ingresa un modelo hipotético y luego éste es refinado por medio de procesos matemáticos, ajustando la curva hasta alcanzar un valor de máxima precisión y obtener el modelo definitivo.



Los resultados e interpretación de los SEV podrían registrarse de la siguiente forma:

Resistividad	Espesor	Profundidad	Interpretación (Tipos de suelo y roca)	Unidad Geológica
Ohm	m	m		

**c) Unidades Geoeléctricas**

A partir de los valores de resistividad de las capas, su posición estratigráfica y su correlación con la litología observada en campo, se definen las unidades geoeléctricas. Como ejemplo para la correlación y sistematización correspondiente se puede emplear el siguiente cuadro:

Unidad Geoeléctricas	Resistividad	Espesor	Interpretación (Tipos de suelo y roca)	Unidad Geológica	Unidad Hidrogeológica	K (m/día) Valor Estimado

#### 4.4.5 Estudio Hidrológico

Se denomina hidrología al estudio de la distribución, espacial y temporal, y las propiedades del agua presente en la atmósfera y en la corteza terrestre. Esto incluye las precipitaciones, la escorrentía, la humedad del suelo, la evapotranspiración y el equilibrio de las masas glaciares.

Un estudio hidrológico, es todo lo referente al agua que entra a una cuenca, ya sea agua superficial o subterránea, y el impacto que genera en su suelo (ejemplo cuanto drena y cuanto escurre y llega al río).

En lo posible se tomarán registros que abarquen un período de 20 años como mínimo.



Fuente: John M. Evans, USGS, Colorado District

##### a) Precipitación pluvial

La precipitación pluvial tiene influencia en el diseño del relleno, ya que el conocimiento de ésta en el sitio seleccionado, será importante para el diseño de los drenajes, el cálculo de volumen de lixiviados que se generará potencialmente, el cálculo de agua de escurrimiento superficial y finalmente ayuda al diseño de las áreas de trabajo en la operación del relleno sanitario.

La precipitación pluvial se mide en mm, que equivale al espesor de la lámina de agua que se formaría, a causa de la precipitación, sobre una superficie plana e impermeable.

## b) Evaporación y Transpiración

La evaporación es el proceso por el cual las moléculas de agua en la superficie de ésta o humedad del suelo adquieren suficiente energía a través de la radiación del sol para escapar del estado líquido al estado gaseoso. La transpiración es el proceso por el cual las plantas pierden agua hacia la atmósfera.

## c) Evapotranspiración

Del agua que es precipitada sobre la tierra, una gran cantidad es regresada a la atmósfera, como vapor, a través de la acción combinada de la evaporación y la transpiración.

La evapotranspiración, puede medirse a través de métodos directos e indirectos. Los primeros proporcionan directamente el consumo total del agua requerida, utilizando para ello aparatos e instrumentos para su determinación. Los segundos en forma directa y bajo la utilización de fórmulas empíricas, obtienen los consumos de agua a través de todo el ciclo vegetativo de la planta. Existen diferentes métodos para el cálculo, como el de Thornthwaite y Turc

### Método de Thornthwaite

La fórmula se basa en la temperatura y en la latitud determinando que esta última constituye un buen índice de la energía en un lugar específico. Sirve para estimar la evapotranspiración potencial y tiene la ventaja de que la fórmula usa datos climatológicos accesibles. Se obtienen buenos resultados en zonas húmedas con vegetación abundante. Su expresión general es:

$$EtNA = 1,6 \left( \frac{10 T}{I} \right)^a$$

Dónde:

Et NA = evaporación potencial no ajustada para meses de 30 días de 12 horas luz (mm)

T = temperatura media mensual (°C)

I = suma de (i) para todos los meses del año o semana anual de calor

a = constante que depende del lugar y que es función del índice de eficiencia anual de temperatura, cuyo valor es:

$$0.000000675 I^3 - 0.0000771 I^2 + 0.017925 I + 0.49239$$

i = eficiencia de la temperatura

I = índice anual de calor (o temperatura). Es la suma de las eficiencias mensuales de Temperatura.

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

$$i = \left( \frac{T}{5} \right)^{1,514}$$

La evapotranspiración potencial no ajustada se corrige por la duración real del día en horas y los días del mes y se obtiene la evapotranspiración potencial ajustada.

$$Et = EtNA * \left(\frac{N}{12}\right) \left(\frac{d}{30}\right)$$

Dónde:

N = número máximo de horas de sol, dependiendo del mes y de la latitud (según Tabla)  
 d = número de días del mes

### Método de Turc

Este método utiliza la siguiente fórmula:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Dónde:

ETR = evaporación real en mm/año  
 P = precipitación en mm/año  
 L =  $300 + 25 t + 0,05 t^3$

A continuación, en el Cuadro N° 4.8 se presenta un resumen acerca de los estudios que se deben realizar en cada uno de los tipos de relleno sanitario.

Cuadro N° 4.8: Estudios y Análisis Previos Requeridos para la Construcción de Rellenos Sanitarios			
Estudios y Análisis	Relleno Mecanizado	Relleno Semi Mecanizado	Relleno Manual
Topográfico	X	X	X
Geológico	X	X	
Hidrogeológico	X	X	
Geotécnico	X	X	X
Hidrológico	X	X	X
Caracterización de Residuos Sólidos	X	X	X

Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS

# **CAPÍTULO V: DISEÑO DEL RELLENO SANITARIO**



## CAPITULO V: DISEÑO DEL RELLENO SANITARIO

### 5.1 Métodos de Construcción del Relleno Sanitario

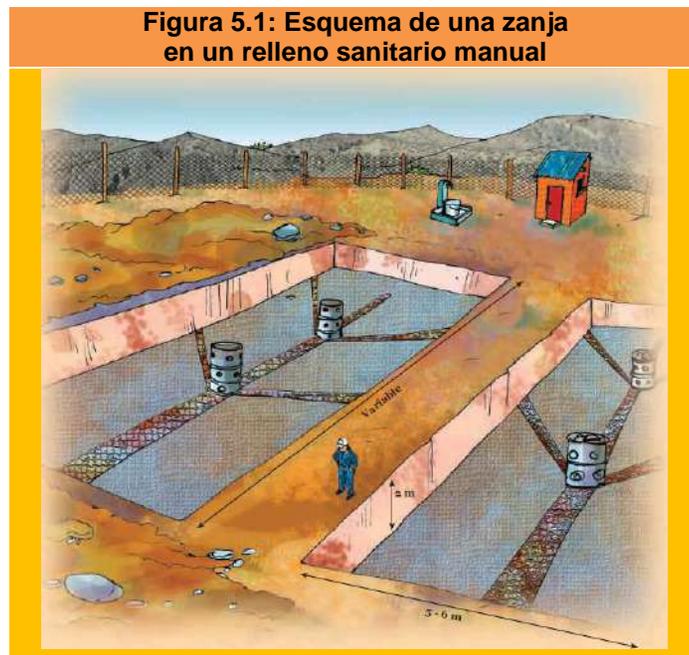
El relleno sanitario puede construirse siguiendo los métodos de área, zanja o la combinación de ambos métodos. La selección del método depende de las condiciones topográficas, características del suelo, el nivel freático y la disponibilidad de material de cobertura.

#### 5.1.1 Método de Trinchera o Zanja

Este método consiste en la excavación de zanjas en suelos con buenas características de cohesión. La profundidad de excavación dependerá del nivel freático, la NB 760 recomienda que como mínimo deba alcanzar los 2 m. El área requerida dependerá del volumen necesario de residuos sólidos y la profundidad media de la zanja, en promedio el ancho de la zanja varía entre los 5 a 6 metros. Por otro lado, el corte de talud debe estar de acuerdo al ángulo del suelo excavado.

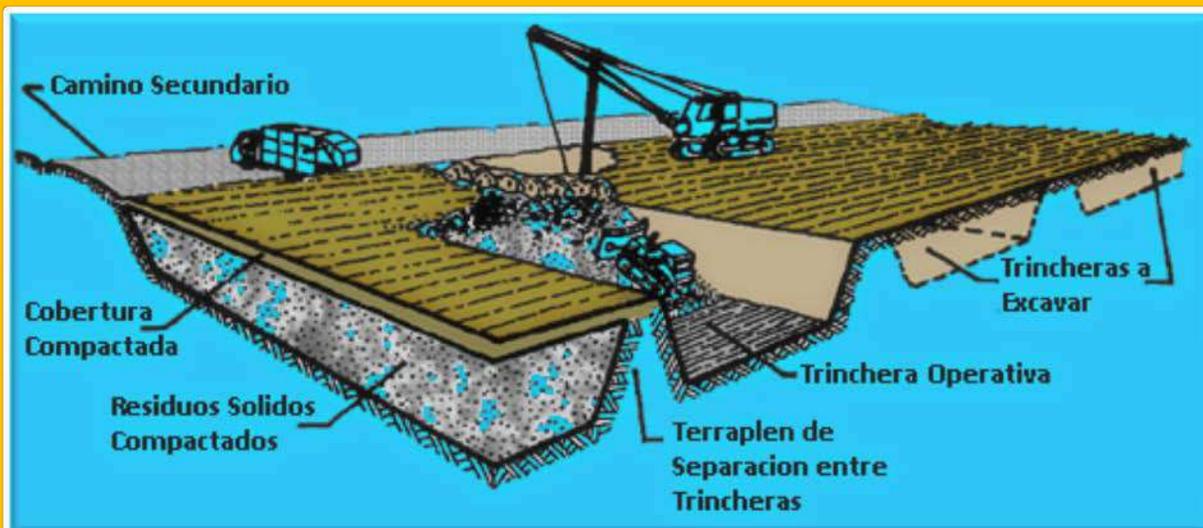
Los terrenos con nivel freático alto o muy próximo a la superficie no son apropiados para este método por el riesgo de contaminar el acuífero; los terrenos rocosos tampoco lo son debido a las dificultades de excavación.

En períodos de alta precipitación pluvial, las aguas pueden inundar las zanjas; para atenuar estas contingencias, se debe construir canales perimetrales de manera de captarlas y desviarlas hacia zanjas para almacenamiento temporal.



**Fuente:** Rellenos Sanitarios para Poblaciones Menores a 10.000 habitantes, Cooperación Danesa, Bolivia, 2008

**Figura 5.2: Esquema de una zanja en un relleno sanitario mecanizado**



Fuente: Programa Regional OPS/HPE/CEPIS de Mejoramiento de los Servicios de Aseo Urbano, 1984

Cuando se trata de terrenos que no son parejos - por ejemplo, con pendientes de 5% y en varias direcciones - y si se busca optimizar el uso del terreno y facilitar las excavaciones, se debe tratar que las zanjas sigan las curvas de nivel. De esta manera, se logra un mejor manejo de la tierra excavada, tanto para su almacenamiento a un lado de la zanja como para su utilización posterior como material de cobertura. Por lo tanto, se recomienda realizar la apertura de las zanjas con excavaciones en la parte inferior del terreno para luego ir ascendiendo a medida que se van llenando.

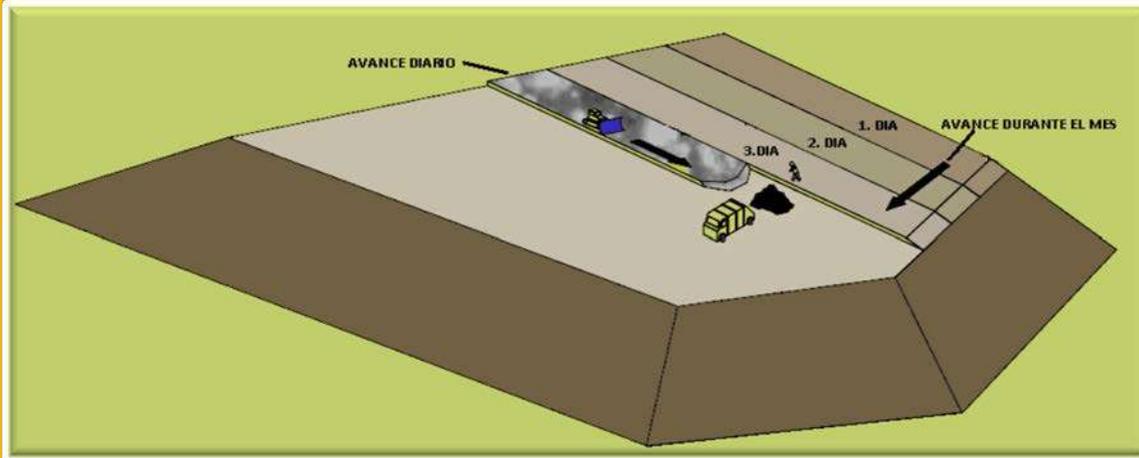
### 5.1.2 Método de Área

El método de área se puede utilizar tanto en terrenos planos como para rellenar depresiones o canteras abandonadas. Este método consiste en depositar los residuos sólidos directamente en el suelo previamente impermeabilizado.

Para este método, el material de cobertura deberá ser transportado desde otros sitios o, de ser posible, extraído de la capa superficial de áreas colindantes. En el caso de depresiones naturales o canteras abandonadas de algunos metros de profundidad, el material de cobertura se excava de las laderas del terreno o, en su defecto, de un lugar cercano para evitar los costos de transporte.

La operación de descarga y construcción de las celdas debe iniciarse desde el fondo hacia arriba. El relleno se construye apoyando las celdas en la pendiente natural del terreno; es decir, los residuos se descargan en la base del talud, se extiende y apisona contra él y se recubre diariamente con una capa de tierra. La aplicación de este método, requiere siempre de la presencia de un sólido terraplén (natural o artificial), de forma de compactara los residuos sobre el mismo.

**Figura 5.3: Método de Área, Relleno Sanitario Mecanizado**



Fuente: Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales, Robén Eva, Loja, Ecuador, 2002

**Figura 5.4: Método de Área, Relleno Sanitario Manual**



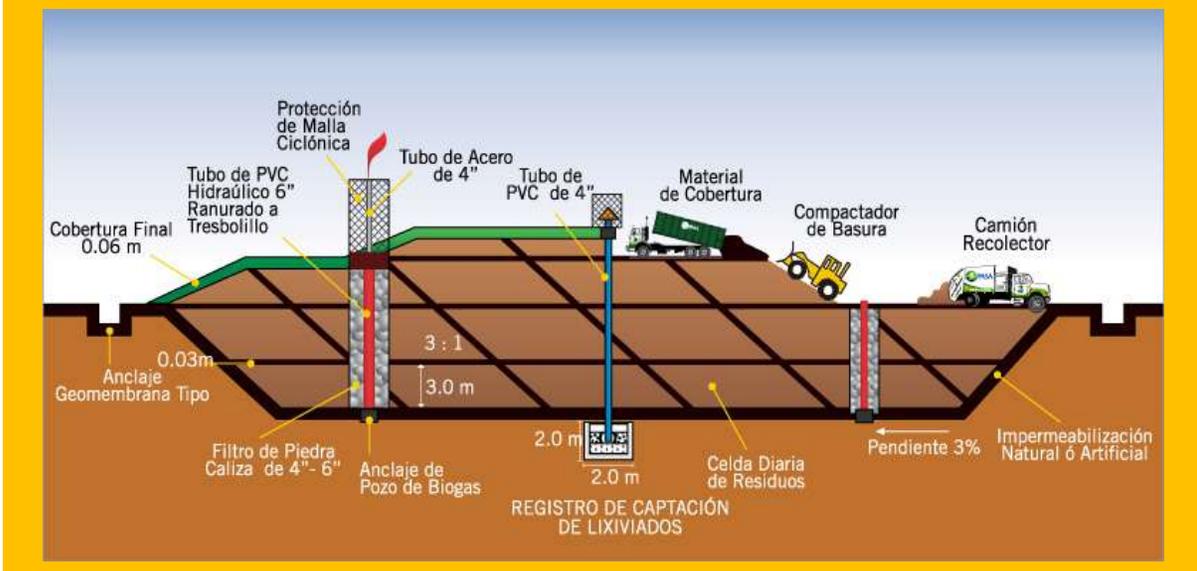
Fuente: Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales, Robén Eva, Loja, Ecuador, 2002

### 5.1.3 Método Combinado

Dado que estos dos métodos de construcción de rellenos sanitarios tienen técnicas similares de operación, es posible combinar ambos para aprovechar mejor el terreno y el material de cobertura, así como para obtener mejores resultados, siempre y cuando la topografía y las condiciones físicas del terreno lo permitan.

Este método consiste en combinar los métodos de zanja y área puesto que presentan técnicas similares de operación. Su importancia radica en el mejor aprovechamiento del terreno y el material de cobertura, así como para obtener mejores resultados.

**Figura 5.5: Método Combinado, Relleno Sanitario Mecanizado**



Fuente: <http://ambientalblog2010.wordpress.com/2010/12/07/los-rellenos-sanitarios/>

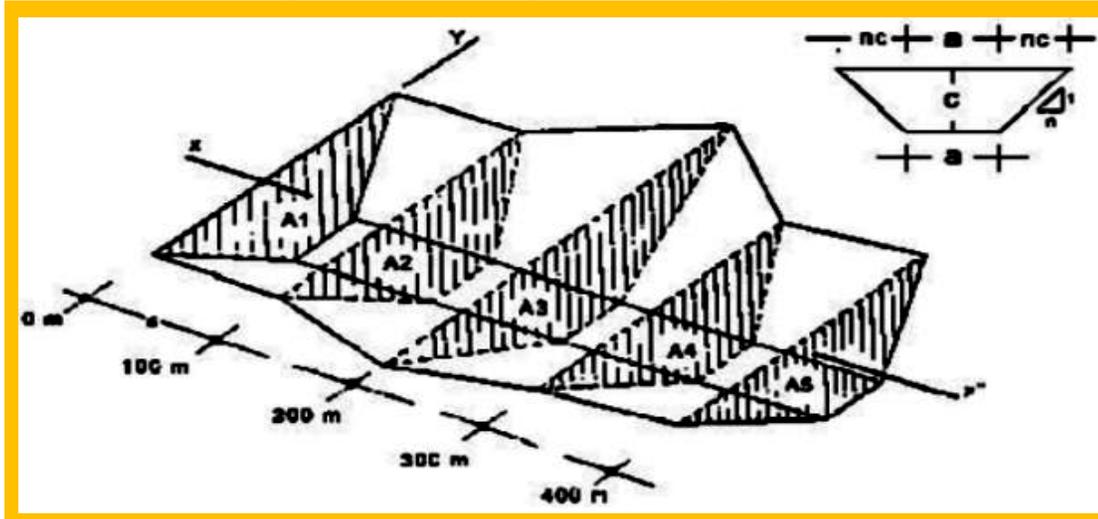
## 5.2 Cálculo de capacidad volumétrica de la celda

La capacidad volumétrica del sitio es el volumen total disponible del terreno para recibir y almacenar los residuos y el material de cobertura que conforman el relleno sanitario. En otras palabras, es el volumen comprendido entre la superficie de desplante y la superficie final del relleno.

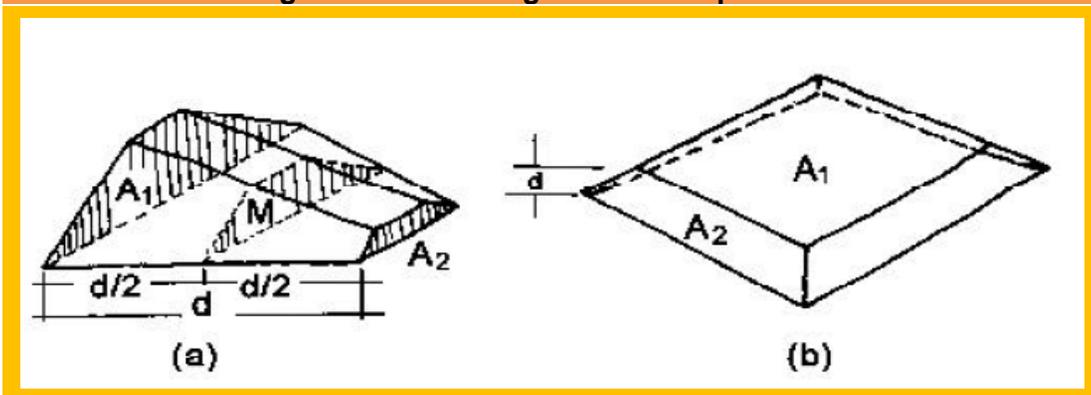
### 5.2.1 Cálculo del volumen por el método de área por la regla del prismoide

El prismoide se define como un sólido que tiene dos caras planas y paralelas de forma regular o irregular, unidas por superficies planas o alabeadas, en las que se puedan trazar rectas desde una hasta la otra cara paralela.

**Figura 5.6: Formas generales del prismoide**



**Figura 5.6: Formas generales del prismoide**



Fuente: Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales, Jaramillo, 2002

Para determinar su volumen puede emplearse la regla de Simpson, que es la misma que se emplea para el cálculo de áreas. Para el cálculo es necesario dividir la figura de forma que resulte un número de secciones equidistantes; tres es el número menor que cumple esta condición.

$$Volumen = \frac{d}{6} (A1 + A2 + 4M)$$

Esta ecuación representa la regla del prismoide, que puede usarse para hallar el volumen de cualquier prismoide, siempre que se pueda conocer el área de la sección media.

**Dónde:**

V = Volumen del área

A1 = Área de la cara plana

A2 = Área de la cara paralela

M = Sección media

El Área de "M" no es el promedio de las áreas A1 y A2.

Ejemplo<sup>19</sup>:

Para un relleno manual se tienen los siguientes datos:

- |      |                           |       |
|------|---------------------------|-------|
| i.   | longitud de la celda      | 100 m |
| ii.  | ancho de la base inferior | 6 m   |
| iii. | profundidad inicial       | 8 m   |
| iv.  | profundidad final         | 5m.   |
| v.   | talud                     | 1:1   |

Solución:

**i. Sección A2:**

Ancho de la base	=	6m
Ancho total	=	(6 + 2c)
Profundidad del eje c	=	5m
Por lo tanto, ancho total	=	(6 + 10) m = 16 m

<sup>19</sup> Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales, Jaramillo J, Colombia

**ii. Sección media M:**

Ancho de la base	=	6m
Ancho total	=	(6 + 2c) m
Profundidad del eje c	=	promedio de profundidad en A1 y A2
	=	$\frac{1}{2} (8 + 5) \text{ m}$
	=	6,5 m
<b>Ancho total</b>	=	6 + 13 m = 19 m (promedio de los anchos en A1 y A2)

**iii. Área de las secciones y trapecios**

A1	=	$\frac{1}{2} (6 + 22) \times 8 = 112 \text{ m}^2$
A2	=	$\frac{1}{2} (6 + 16) \times 5 = 55 \text{ m}^2$
M	=	$\frac{1}{2} (6 + 19) \times 6,5 = 81,25 \text{ m}^2$

**iv. Volumen**

$$Volumen = \frac{100}{6} (112 + 55 + 4(81,25))$$

$$Volumen = 8.200 \text{ m}^3$$

Otra ecuación que se puede aplicar para el cálculo de volumen es la siguiente<sup>20</sup>:

$$V = \frac{1}{3} h(a * b + c * d + \sqrt{(a * b) * (c * d)})$$

En relación con los taludes de residuos sólidos para la conformación de terraplenes se recomienda un talud de 1/2 ó 1/3 (Jaramillo, 2002).

Ejemplo aplicativo: Se tiene una trinchera de las siguientes dimensiones:

Largo de la Trinchera	:	76.00 metros
Ancho de la Trinchera	:	7.00 metros
Profundidad Promedio de la Trinchera	:	2.50 metros.
Talud de las Trincheras	:	H/V: 1/2

Adecuando los datos tenemos:

a	=	76,00
b	=	7,00
c	=	4,5
d	=	73,5

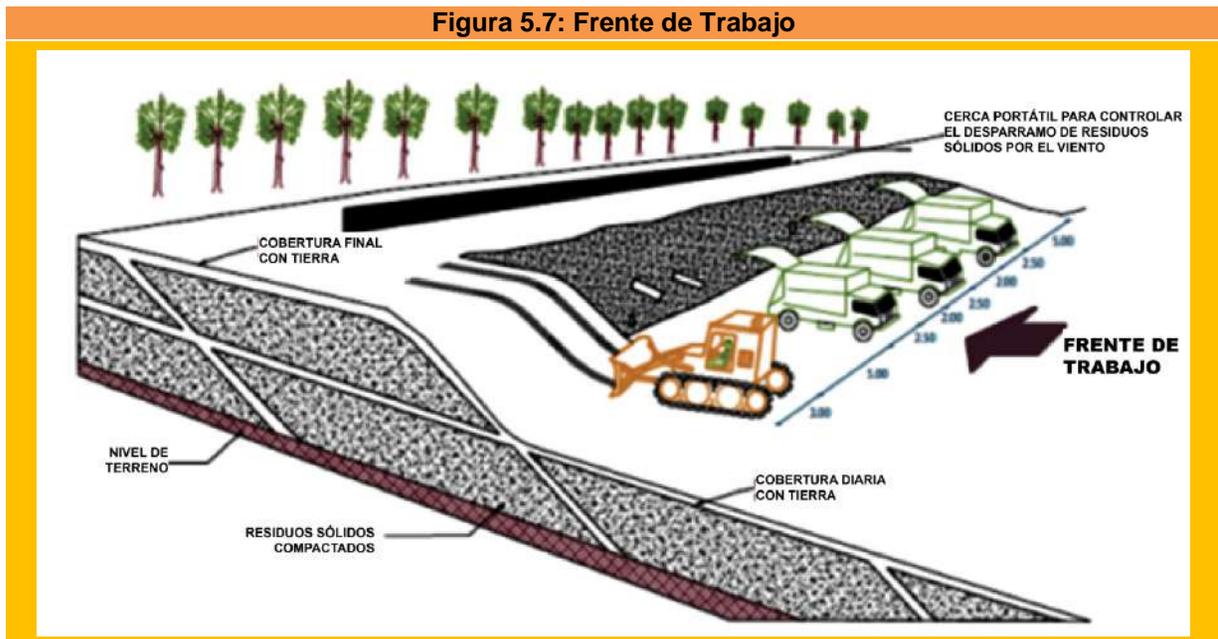
$$Volumen = 1068,52 \text{ m}^3$$

### 5.3 Diseño de la celda diaria

Se llama celda diaria a la conformación geométrica que se le da a los residuos sólidos y al material de cobertura debidamente compactados mediante un equipo mecánico o manual. Dicho elemento es la unidad básica de construcción de un relleno sanitario, siendo un espacio específicamente definido, dentro del cual se confinan y compactan los residuos de un día de operación. Al conjunto de varias celdas adyacentes de la misma altura, se les denomina franja y al conjunto de franjas, se denomina capas.

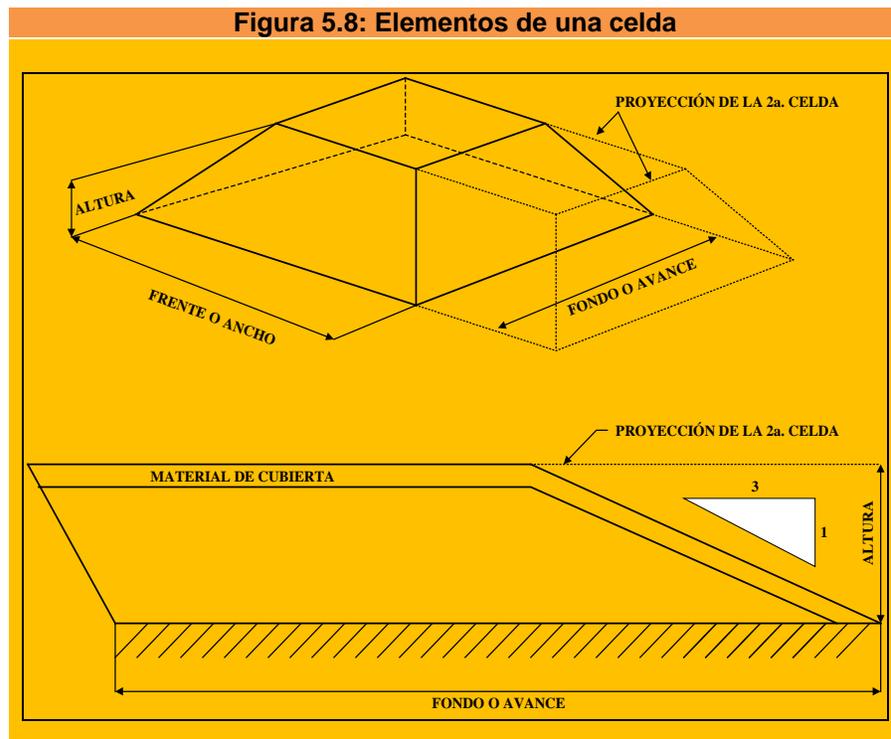
<sup>20</sup> Guía de diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de rellenos sanitario mecanizado, Sandoval L, Perú

Los elementos de una celda son: altura, largo, ancho del frente de trabajo, pendiente de talud y laterales y espesores del material de cubierta diario y del último nivel de celdas tal como se muestra en la siguiente figura:



Fuente: Guía de diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de rellenos sanitario mecanizado, Sandoval L, Perú

Las dimensiones y volumen de las celdas dependen del área total del relleno, del volumen diario de residuos por recibir, del equipo empleado y del material de cobertura.



Fuente: Manual de Operación de Relleno Sanitario, SEDESOL, México, 2005

### 5.3.1 Altura

La altura de la celda depende de la cantidad de los residuos que se depositen, del espesor de material de cobertura (tierra), la estabilidad de los taludes y las especificaciones técnicas de la maquinaria empleada para la compactación de los residuos sólidos. Se recomienda la altura máxima de 5 m incluyendo el espesor a disponer y el material de la cubierta requerido.

### 5.3.2 Ancho

El ancho de la celda ó frente de trabajo debe determinarse por la longitud necesaria para el funcionamiento adecuado y ejecución de maniobras del equipo, tanto de compactación como de transporte. En lo posible, la parte delantera debe ser lo más angosto posible para concentrar los esfuerzos de compactación y reducir los requerimientos de material de cobertura. También debe ser suficientemente ancho para impedir la congestión de camiones esperando para descargar. Para efectos de operación, se recomienda que el ancho mínimo sea de 2 a 2,5 veces el largo de la cuchilla de la maquinaria.

$$F = \sum_{i=1}^n (X_i)^2$$

Dónde:

F= Longitud del frente de trabajo, en metros.

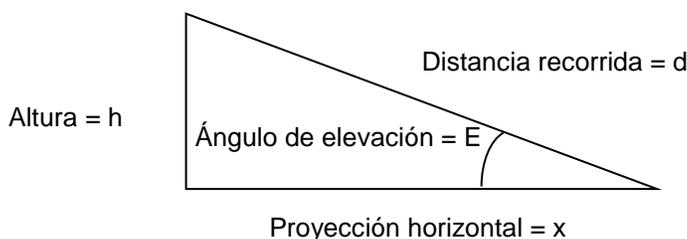
Xi= Ancho de la hoja topadora de cada una de las máquinas que se utilizarán simultáneamente, en metros.

En los métodos de trinchera existe únicamente un frente de trabajo.

En el método de área y combinado pueden existir dos frentes de trabajo.

### 5.3.3 Talud

El talud de la celda es el plano inclinado en donde se apoyan los residuos y los equipos compactadores. Su inclinación se especifica mediante un ángulo o una relación que indica el número de unidades que avanza en dirección vertical por cada unidad que se avanza horizontalmente. Se recomienda que las celdas tengan un talud máximo de 1 a 3, es decir, que por cada metro de altura se avancen 3 metros horizontalmente. (SEDUE, 1984).



### 5.3.4 Material de cobertura

El material de cobertura es la tierra necesaria que cubre los residuos, después de haberlos depositado, esparcido y compactado; este material, evita la proliferación de animales como ratas; insectos; moscas y mosquitos; malos olores al descomponerse los residuos y la dispersión de los residuos fuera del relleno por el viento.

Si bien el tipo y tamaño puede variar, entre el 20 a 25% del volumen de un relleno sanitario, corresponde a la tierra utilizada para cobertura (incluyendo cobertura diaria y final). Por lo general,

equivale a un espesor de 15 a 20 cm. compactados de tierra entre los niveles de celdas y con cobertura final con material apropiado en un espesor no menor de 0,50 m.

Así mismo, el tipo de material de cobertura a emplear es importante, puesto que orienta en el tipo de maquinaria que también debe emplearse, por ejemplo si la tierra es arenosa o altamente abrasiva, será mejor utilizar un cargador con ruedas de goma o una trailla en lugar de una oruga de cadenas.

### 5.3.5 Volumen de la celda

El volumen de la celda se determina empleando la siguiente ecuación:

$$V_c = \left(\frac{G_T}{D}\right) M_c$$

Dónde:

- V<sub>c</sub> = Volumen de la celda diaria, en m<sup>3</sup>
- G<sub>T</sub> = Cantidad media de residuos sólidos que llegan al relleno sanitario, en (kg)
- D = Densidad de los residuos sólidos
- M<sub>c</sub> = Factor de material de cobertura (1.2 a 1.25)

### 5.3.6 Volumen total ocupado

En el caso de rellenos en zanjas o método combinado, el volumen total de residuos sólidos comprende el volumen de la zanja y el volumen de la plataforma. Adicionalmente al cálculo de volumen debe considerarse el material de cobertura necesario.

$$\begin{aligned} VT &= V_p + V_c \\ MC &= (20\% \text{ a } 25\%) VT \\ 25\% VT &= V_1 \end{aligned}$$

Dónde:

- V<sub>T</sub> = Volumen total ocupado por los residuos sólidos
- V<sub>p</sub> = Volumen total de plataforma
- V<sub>c</sub> = Volumen total de zanja

### 5.3.7 Largo de la celda

Se calcula en función de la altura y el ancho previamente determinados, y la configuración trapezoidal de la celda diaria:

$$L = \frac{V}{A_c \times A_T}$$

Dónde:

- L = Largo de la celda, en metros
- V = Volumen de la celda, en metros cúbicos
- A<sub>c</sub> = Ancho de la celda, en metros
- A<sub>T</sub> = Altura de la celda, en metros

### Ejemplo cálculo de volumen de la celda<sup>21</sup>

<sup>21</sup> Manual de Operación de Relleno Sanitario, SEDESOL, México, 2005

Suponiendo que un municipio genera 150 toneladas diarias de residuos sólidos, calcular en volumen de la celda diaria que se requiere para confinarlos. Para este ejemplo consideramos un frente de trabajo de 15 metros y una altura de 1.5 metros.

Datos:

Cantidad de residuos ( $G_T$ )	= 150 toneladas/día
Densidad de compactación (D)	= 700 kg/m <sup>3</sup>
Factor de material de cobertura (Mc)	= 1.2

Reemplazando en la ecuación:

$$V_c = \left(\frac{G_T}{D}\right) M_c$$

Reemplazando los datos, se requieren 257 m<sup>3</sup> por día de espacio para el confinamiento de los residuos generados.

Para determinar el largo o avance se tiene la siguiente ecuación:

$$L = \frac{V}{A_c \times A_T}$$

Volumen de la celda (V)	= 257 m <sup>3</sup>
Ancho de la celda o frente de trabajo ( $A_c$ )	= 15 metros
Altura de la celda ( $A_T$ )	= 1.5 metros

Resultando un avance de 11.4 metros por día.

### 5.3.8 Cálculo de la vida útil del terreno

Se llama vida útil de un relleno sanitario al tiempo en años que se utilizará un sitio seleccionado para la disposición final de los residuos sólidos de una comunidad. La vida útil del sitio depende de muchas variables tales como: el volumen disponible del mismo, la cantidad de residuos sólidos a disponer y el método de operación.

En los casos en que se dispone previamente con un terreno, el cálculo de la vida útil se puede realizar mediante la siguiente ecuación:

$$n = \frac{A_t}{F * A_z}$$

Dónde:

n	=	Número de zanjas
$A_t$	=	Área del terreno (m <sup>2</sup> )
F	=	Factor para áreas adicionales de 1.2 a 1.3
$A_c$	=	Área de la celda (m <sup>2</sup> )

Entonces la vida útil estará dada por:

$$V_u = \frac{t_z * n}{365}$$

Dónde:

$V_u$	=	Vida útil del terreno (años)
$t_z$	=	Tiempo de servicio de la celda (días)

## 5.4 Diseño del sistema de drenaje pluvial

El manejo de las aguas pluviales tiene como objetivo evitar su infiltración al interior del volumen de residuos sólidos, para evitar principalmente el aumento de líquidos lixiviados y gases, la erosión del sellado o cobertura del relleno sanitario, así como el deterioro de los caminos de acceso y a otras obras de infraestructura. Especialmente las aguas de lluvia que atraviesan las capas de residuos aumentan el volumen de lixiviados en una proporción mucho mayor que la que produce la misma humedad de éstos.

Para tal efecto, se deberán construir drenajes pluviales internos y externos en el perímetro del área:

- ✓ Los canales pluviales internos serán de área transversal pequeña a mediana
- ✓ La zanja de coronamiento o perimetral será de área transversal mayor a mediana

El grado de pendiente de los canales internos debe ser diseñado con la finalidad de asegurar el escurrimiento de las aguas superficiales desde el interior del relleno hacia los puntos de evacuación que se hayan proyectado o fuera de la superficie, por lo general deberán tener una pendiente mínima del 2%. Las aguas procedentes de la lluvia deben escurrir sobre la superficie de cubierta final sin que se produzca una erosión excesiva o una filtración.

La Norma Boliviana NB 760 indica que para el dimensionamiento del sistema de captación de aguas pluviales, se deberá utilizar la fórmula de Manning, para obtener el gasto de diseño garantizando que la velocidad del agua dentro de los canales no deban ser menor a 0,60 m/s ni mayor a 2,00 m/s.

Con la información topográfica e hidrológica disponible, se deberá calcular el tamaño de los canales de drenaje superficial. Los cálculos hidráulicos ordinarios dependen de la gradiente, de la zona superficial de las captaciones de agua superficial y la frecuencia de la precipitación pluvial. A continuación, se presenta el procedimiento del diseño del sistema de drenaje pluvial o zanja de interceptación.

1. Estudiar un plano del sitio a escala 1:1000, seleccionando la curva de nivel que sea adecuada para colocar la zanja. La zanja siempre debe ser trasladada en la curva de nivel para garantizar una velocidad máxima que no provoque erosión excesiva.
2. Determinar la velocidad de diseño en la zanja. Dentro de las limitaciones impuestas por la topografía, la ruta exacta de una zanja queda definida por las pendientes que pueden tolerarse o admitirse. La pendiente excesiva puede producir una velocidad suficiente para causar erosión en la plantilla de la zanja.

La velocidad con la cual se iniciará la erosión depende del material del lecho. En el cuadro N° 5.1 se muestra los parámetros de velocidades promedio del agua en zanjas.

También es necesario asegurar una velocidad mínima que impida la sedimentación, debido a que el lodo en suspensión en el agua, puede depositarse si la velocidad es muy baja. Por lo tanto, las velocidades de diseño deben ser ligeramente menores que las máximas permisibles, si la topografía lo permite

3. Estimar el coeficiente de escurrimiento (k) de la cuenca, usando el cuadro N° 5.2.

**Cuadro 5.1: Velocidades Promedio del Agua en Zanjas por Tipo de Material**

Material de la zanja	Velocidad (m/seg)	
	Agua clara	Agua con sedimento abrasivo
Arena Fina	0,45	0,45
Migajón Limoso	0,60	0,60
Grava fina	0,75	1,05
Arcilla rígida	1,20	0,90
Grava gruesa	1,20	1,80
Pizarra, tepetate	1,80	1,50
Acero	*	2,40
Madera	6,00	3,00
Concreto	12,00	3,60

Fuente: Dr. Kuntoshi Sakurai, CEPIS, Lima \* Limitada únicamente por posible cavilación

**Cuadro 5.2: Valores empíricos para obtener el coeficiente de escurrimiento (k)**

A. Topografía	
Terreno plano con pendiente del orden de 0,2 – 0,6 m/km	0,30
Terreno con inclinación leve del orden de 3 – 4 m/Km	0,20
Terreno con inclinación fuerte del orden de 30 – 50 m/Km	0,10
B. Suelo	
Arcilla	0,10
Arcilla con migajón	0,20
Arcilla arenoso	0,30
C. Cobertura	
Terrenos agrícolas y pastizales	0,10
Áreas boscosas	0,20

Fuente: Dr. Kunitoshi Sakurai, CEPIS, Lima

Se puede obtener el coeficiente k como sigue:

$$K = 1 - (A. + B. + C.)$$

- Adoptar la intensidad de la lluvia de diseño, analizando los datos meteorológicos del sitio. Generalmente se usa la siguiente ecuación de intensidad de la lluvia:

$$i = \frac{j \cdot t p^l}{t r_m}$$

Dónde:

i	=	Intensidad de la lluvia (mm/hora)
tp	=	Recurrencia (años)
tr	=	Duración de la lluvia (minutos)
j, l, m	=	Características regionales

- Calcular el tiempo de concentración (tc) en minutos. El tiempo de concentración (tc) para una cuenca pequeña sería igual a la combinación más larga del tiempo de escurrimiento sobre el terreno (t<sub>1</sub>) y del tiempo de escurrimiento en la zanja (t<sub>2</sub>).

$$t_c = t_1 + t_2$$

El tiempo, de escurrimiento sobre el terreno (t<sub>1</sub>) está dado por la ecuación siguiente:

$$t_1 = \frac{235 b L_1^{1/3}}{(ki)^{2/3}}$$

Dónde:

L1 = Longitud del flujo de escurrimiento sobre el terreno (m)

El coeficiente b está dado por la ecuación siguiente:

$$b = \frac{0,000028i + Cr}{(S_1)^{1/3}}$$

Dónde:

S1 = pendiente de la superficie

Cr = coeficiente de retraso

**Cuadro 5.3: Valores de coeficiente de retraso**

Valores del coeficiente de retraso	Cr
Superficies lisas asfálticas	0,007
Pavimento de concreto	0,012
Pavimento de gravado	0,017
Césped muy tupido	0,046
Pasto azul denso	0,060

Fuente: Dr. Kunitoshi Sakurai, CEPIS, Lima

El tiempo, en minutos, de escurrimiento en la zanja ( $t_2$ ) se toma comúnmente como la longitud de la zanja más larga ( $L_2$ ), dividida entre la velocidad de diseño de la misma ( $V_2$ ).

$$t_2 = \frac{L_2}{V_2}$$

6. Calcular el máximo del escurrimiento en la zanja ( $Q_p$ ), en metros cúbicos por segundo, usando la siguiente ecuación llamada comúnmente como la fórmula racional:

$$Q_p = \frac{K * i * Ad}{3.6 * 106}$$

Dónde:

K = Coeficiente de escurrimiento

i = Intensidad de la lluvia para una duración igual a  $t_c$  (mm./hora)

Ad = Área de la cuenca ( $m^2$ )

7. Calcular el tamaño de la sección transversal de la zanja en metros cuadrados ( $A_2$ ), usando la siguiente ecuación:

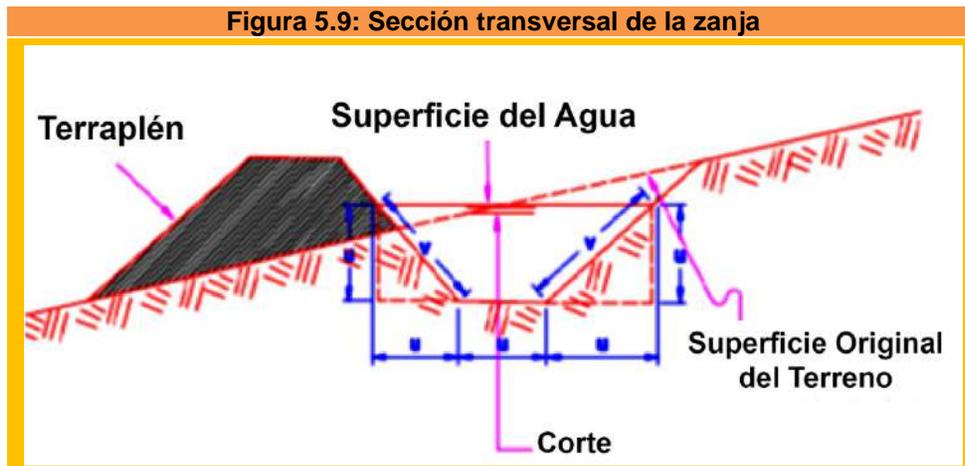
$$A_2 = \frac{Q_p}{V_2}$$

8. Decidir la sección transversal de la zanja. Las zanjas de tierra generalmente son trapeciales, con taludes determinados por la estabilidad del material en sus bancos. El siguiente cuadro enumera las pendientes típicas de taludes para zanjas no revestidas, en diversos materiales.

Cuadro 5.4: Taludes Típicos para Zanjas No Revestidas	
Material de la excavación	Taludes (horizontal : vertical)
Roca firma	1/4:1
Roca fracturada	1/2: 1
Suelo firme	1: 1
Migajón gravoso	1 1/2: 1
Suelo arenoso	2 1/2: 1

Fuente: Dr. Kunitoshi Sakurai, CEPIS, Lima

Se emplea la siguiente sección transversal como ejemplo:



Fuente: Guía de diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de rellenos sanitario mecanizado, Sandoval L, Perú

En esta sección transversal, el área de la sección está dada por la ecuación siguiente:

$$A_2 = u_2$$

- Calcular el radio hidráulico R en metros (área de la sección transversal dividida entre el perímetro mojado). Para el ejemplo arriba mencionado se calcula como sigue:

$$R = \frac{A_2}{u + 2v}$$

- Finalmente se calcula la pendiente de la plantilla de la zanja ( $S_2$ ), usando la siguiente ecuación comúnmente llamada de Manning:

$$V_2 = \frac{R^{2/3} * A_2^{1/2}}{n}$$

Dónde:

- $V_2$  = Velocidad de diseño en la zanja (m/s)  
 $n$  = Valores del coeficiente de rugosidad (ver la siguiente tabla)

Cuadro 5.5: Velocidades del coeficiente de rugosidad (n)	
Material de la zanja	n
Plástico, vidrio, tubería estirada	0,009
Cemento puro, metal liso	0,010

Cuadro 5.5: Velocidades del coeficiente de rugosidad (n)	
Material de la zanja	n
Madera cepillada, tubería asbesto	0,011
Hierro forjado, acero soldado, lona	0,012
Concreto ordinario, hierro colocado asfáltico	0,013
Madera no cepillada, barro vitrificado	0,014
Tubería de hierro colado	0,015
Acero remachado, tabique	0,016
Mampostería de pedacería	0,017
Tierra emparejada	0,018
Grava firme	0,020
Tubería de metal corrugado	0,022
Corrientes naturales en buena condición	0,025
Corrientes naturales con piedras y hierbas	0,035
Corrientes naturales en muy malas condiciones	0,060

Fuente: Dr. Kunitoshi Sakurai, CEPIS, Lima

## 5.5 Lixiviados, Manejo y Tratamiento

### 5.5.1 Formación de lixiviado

Los lixiviados de rellenos sanitarios se producen por la disolución de uno o más compuestos de los residuos sólidos, en contacto con un disolvente líquido (agua) o por la propia dinámica de descomposición de los residuos. Contienen una gran cantidad de sólidos en suspensión y materia orgánica altamente contaminante. Su generación está directamente relacionada con las condiciones climatológicas (precipitación, temperatura, humedad, evapotranspiración, radiación solar, etc.), propiedades del suelo, humedad de los residuos y la metodología de trabajo del relleno sanitario.

*Es importante la estimación del lixiviado a generarse porque será la base de cálculo para los sistemas de drenaje o captación a construirse. y los sistemas de tratamiento que se pueda aplicar.*

Como regla general, para determinar la formación de cualquier lixiviado, se compara la humedad disponible con la capacidad de campo del relleno sanitario. Si la cantidad de agua presente (humedad disponible) excede la capacidad de campo del relleno sanitario, se formará lixiviado.

**Lixiviado = Agua en el residuo + Infiltración agua de lluvia + Entradas agua subterránea**



Fuente: Manual de Operación de Relleno Sanitario, SEDESOL, México, 2005

#### 5.5.1.1 Composición y Características de los lixiviados

La composición media de estos líquidos varía considerablemente según áreas geográficas, edad del relleno sanitario y tipo de residuo depositado en el mismo, pero todos coinciden en una alta carga orgánica, DQO y DBO<sub>5</sub>; como principal factor contaminante. Además de los dos citados, los lixiviados, contienen toda característica contaminante principal, es decir, alto contenido de materia orgánica, alto contenido de nitrógeno y fósforo, presencia abundante de patógenos e igualmente de sustancias tóxicas como metales pesados y constituyentes orgánicos.

En el siguiente cuadro se listan los principales componentes y la evolución que llevan los primeros años de vertido:

Cuadro 5.6: Variación de los lixiviados con la edad del vertido				
Componente	Concentración en mg/l			
	1 año	2 años	3 años	4 años
DBO	4.460	13.000	11.359	10.907
DQO	11.210	20.032	21.836	18.533
Sólidos disueltos	11.190	14.154	13.181	13.029
pH	7,1	6,6	7,3	6,9
Alcalinidad (CaCO <sub>3</sub> )	5.685	5.620	4.830	5.404
Dureza (CaCO <sub>3</sub> )	5.116	4.986	3.135	4.652
Calcio	651	894	725	818
Magnesio	652	454	250	453
Fosfatos	3	3	3	3
N-Kjendal	1.660	760	611	984
Sulfatos	114	683	428	462
Cloruros	4.816	4.395	3101	4.240
Sodio	1.177	1.386	1.457	1.354
Potasio	969	950	968	961
Cadmio	0,04	0,09	0,1	0,09
Cromo	0,16	0,43	0,22	0,28
Cobre	0,44	0,39	0,32	0,39
Hierro	245	378	176	312
Niquel	0,53	1,98	1,27	1,55
Zinc	8,7	31	11	21
Mercurio	0.007	0,005	0,011	0,007

Fuente: Tratamiento y Gestión de Residuos Sólidos, Universidad Politécnica de Valencia

**Figura 5.11: Calidad de los Lixiviados**

CARACTERÍSTICA	LIXIVIADO JOVEN	LIXIVIADO VIEJO
DBO	Muy alto	Bajo
DQO	Muy alto	Alto
Amoniaco	Muy alto	Alto
Fósforo	Usualmente Deficiente	Suficiente
pH	Muy bajo	Bajo
Detergentes	Muy Altos	Bajos
Sales disueltas	Muy Altas	Bajas (relativamente)
Agentes Incrustantes (Fe, Ca, Mg)	Muy Altos	Bajos
Metales Pesados	Muy Altos	Bajos

Fuente: Manejo Integrado de Residuos Sólidos Urbanos, Giraldo E., 1997

El lixiviado se produce y cae lentamente por gravedad dentro de los residuos. El diseño de rellenos sanitarios con alturas menores de 15 m debe permitir que el lixiviado continúe por los residuos hasta la capa inferior de material permeable.

### 5.5.2 Métodos para el cálculo de lixiviados

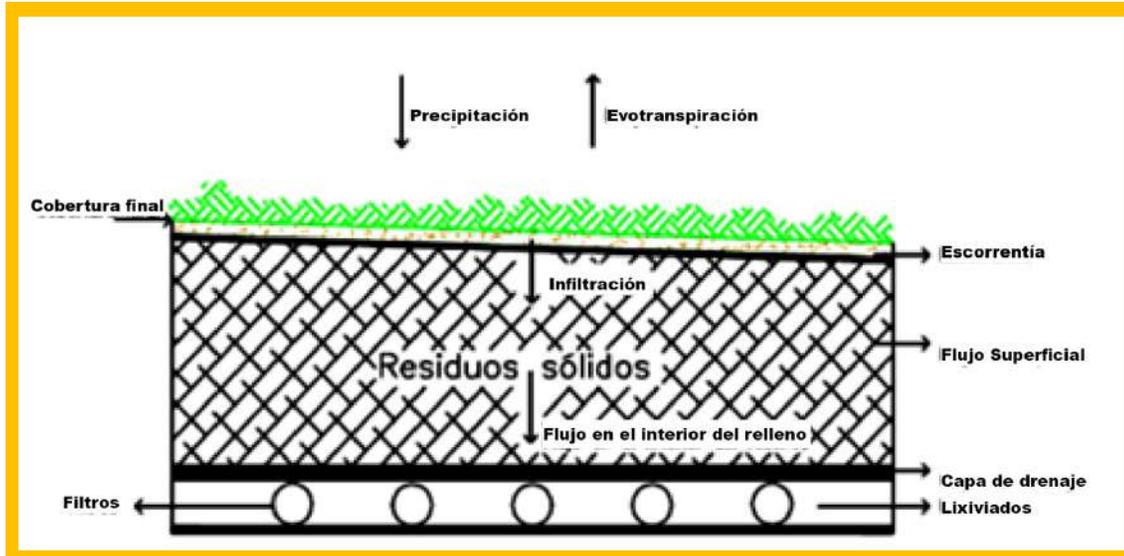
Existen diferentes métodos para el cálculo de lixiviados como el balance hidráulico, el método HELP y el método suizo. A continuación, se describe cada uno de ellos.

#### 1) Balance de agua hidráulico

La cantidad de lixiviado que podría generarse en un relleno sanitario se puede predecir mediante un balance de agua (hidráulico). El balance hidráulico incluye el recuento de todos los flujos de líquidos que ingresan y egresan del relleno sanitario, y del líquido almacenado dentro del sistema. En la mayoría de los rellenos sanitarios, los flujos más significativos que ingresan a ellos son la precipitación y el agua obtenida en los residuos sólidos cuando llegan al relleno sanitario; mientras que el flujo más importante que egresa del relleno sanitario es el lixiviado.

Como consecuencia de los procesos de descomposición que ocurren en un relleno sanitario, cierta cantidad de humedad se convierte en los elementos constitutivos del gas del relleno sanitario (es decir, en Metano CH<sub>4</sub> y Dióxido de Carbono CO<sub>2</sub>). Además, el agua también sale del relleno sanitario en forma de vapor de agua saturado en el gas de relleno sanitario, el resto del agua se convierte en lixiviado.

**Figura 5.12: Esquema del Modelo Conceptual General de Balance Hídrico en Rellenos Sanitarios**



El balance hidráulico consta principalmente de la precipitación que percola a través de la cobertura, sin embargo, pueden haber otras fuentes de agua superficial, como la escorrentía del agua de lluvia y manantiales artesianos.

Los elementos que influyen el balance hidráulico son los siguientes:

- ✓ Precipitación pluvial en el área del relleno.
- ✓ Escorrentía superficial y/o infiltración subterránea.
- ✓ Evapotranspiración.
- ✓ Humedad natural de los residuos sólidos
- ✓ Capacidad de campo (capacidad del suelo y de los residuos sólidos para retener humedad).

El flujo en una capa de percolación vertical es descendente (debido a la gravedad) o también puede ser eliminado por evapotranspiración.

La expresión generalizada del balance de agua como se indica a continuación, expresa la igualdad entre los aportes y las pérdidas de humedad.

$$\Delta CH = P - CE - ET - PER$$

Dónde:

- $\Delta CH =$  Cambio en la cantidad de humedad almacenada en una unidad de volumen de la cobertura del relleno sanitario.
- $P =$  Cantidad neta de precipitación (precipitación que incide menos escorrentía) por unidad de área.
- $CE =$  Cantidad de escorrentía por unidad de área.
- $ET =$  Cantidad de humedad perdida mediante evapotranspiración por unidad de área.
- $PER =$  Cantidad de agua que percola a través de la cobertura por unidad de área de la cobertura.

La cantidad total de humedad que puede almacenarse en una unidad de volumen de suelo depende de dos variables: la capacidad de campo (CC) y el Porcentaje de Marchitamiento Permanente (PMP). La información referente a precipitación y evapotranspiración en lugares específicos, generalmente puede obtenerse a través del SENAMHI (Servicio Nacional de Metrología e Hidrología).

En el cuadro siguiente, se presentan coeficientes de escorrentía, en función de la precipitación, para diferentes tipos de suelos con y sin cobertura vegetal.

Cuadro 5.7: Escorrentía para Diferentes Materiales de Cobertura y Diferentes Tipos de Vegetación				
Cobertura del suelo	Pendiente (%)	Textura del suelo		
		Arcilla arenosa	Arcilla margosa	Arcilla
Suelo con hierba	0 a 5	0,10	0,30	0,4
	5 a 10	0,16	0,36	0,55
	10 a 30	0,22	0,42	0,60
Suelo simple		0,30	0,50	0,60
		0,40	0,60	0,70
		0,52	0,72	0,82

Fuente: Guía de diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de rellenos sanitario mecanizado, Sandoval L, Perú

### Capacidad del campo de un relleno sanitario

La capacidad de campo (CC) se define como la máxima cantidad de líquido que permanece en el espacio de poro sujeto a la fuerza gravitatoria.

Los materiales que forman parte de la cobertura, así como los residuos sólidos del relleno sanitario tienen su propia capacidad de campo, la cual puede almacenar la humedad y mantenerla hasta que se llegue al nivel de saturación. La cantidad potencial de lixiviado que puede generarse en un relleno sanitario específico es la cantidad de humedad excedente de la capacidad de campo del relleno sanitario.

La capacidad de campo de un relleno sanitario varía en función del peso de la sobrecarga (esto es, la fracción de agua en los residuos sólidos basada en el peso seco de los residuos sólidos), y puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$CC = 0,60 - 0,55 \left( \frac{P}{10.000 + P} \right)$$

Dónde:

CC = Capacidad de campo

P = Peso de la sobrecarga calculada en medio de la franja (Kg).

### Presencia de agua en los residuos sólidos

La humedad que ingresa al relleno sanitario con los residuos sólidos es agua inherente a ellos, así como la humedad que ha sido absorbida de otras fuentes (por ejemplo, la precipitación). De acuerdo a las condiciones climáticas, así como al tipo y a la calidad de los recipientes que se usan para almacenar los residuos sólidos para su recolección, la humedad inherente y la humedad de otras fuentes tienen una gama de valores. El contenido de humedad de los residuos sólidos en países en desarrollo generalmente varía de 30% a 60%, (peso húmedo) según la ubicación y la estación.

### Agua en el material de cobertura

La cantidad de agua que ingresa con el material de cobertura depende del tipo y de la fuente del material, así como de la estación y de las condiciones climáticas de la ubicación específica. La cantidad máxima de agua que puede estar contenida en el material de cobertura se determina por la capacidad de campo del material.

### Agua utilizada en la formación del gas del relleno sanitario

La descomposición de la fracción orgánica de los residuos sólidos utiliza cierta cantidad de agua. Puede calcularse la cantidad de agua que usa el proceso mediante aproximaciones teóricas del proceso de descomposición.

### Pérdida de agua en forma de vapor en el gas del relleno sanitario

Comúnmente, el gas del relleno sanitario está saturado con vapor de agua. Puede estimarse la cantidad de humedad que sale del relleno sanitario por medio de la ley de gases.

### Humedad almacenada en el relleno sanitario

Dados todos los elementos en las secciones anteriores, los componentes del balance hidráulico para un relleno sanitario pueden expresarse del siguiente modo:

$$\Delta CH = A_{sw} + A_c + A_p - A_{lfg} - A_v - A_{evap} - A_{lix}$$

**Dónde:**

$\Delta CH$	=	Cambio en la cantidad de humedad almacenada en el relleno sanitario (Kg/m <sup>3</sup> )
$A_{sw}$	=	Humedad en los residuos sólidos que ingresan al relleno sanitario (Kg/m <sup>3</sup> )
$A_s$	=	Agua en el material de cobertura que se coloca sobre los residuos sólidos (Kg/m <sup>3</sup> )
$A_p$	=	Agua de la precipitación y otras fuentes externas (menos escorrentía) (Kg/m <sup>3</sup> ).
$A_{lfg}$	=	Agua utilizada en la formación del gas del relleno sanitario (Kg/m <sup>3</sup> )
$A_v$	=	Agua perdida como vapor saturado con el gas del relleno sanitario (Kg/m)
$A_{evap}$	=	Humedad perdida debido a la evapotranspiración (Kg/m)
$A_{lix}$	=	Agua que sale del relleno sanitario (volumen control) como lixiviado (Kg/m <sup>3</sup> ).

## 2) Método HELP HYDROLOGIC EVALUATION OF LANDFILL PERFORMANCE, (Evaluación Hidrológica del Rendimiento del Relleno, HELP)

Es un programa que corresponde a un modelo hidrológico cuasi bidimensional que representa el movimiento del agua dentro, a través y fuera de un relleno sanitario.

Permite una rápida estimación de la cantidad de líquido percolado, escorrentía superficial, evapotranspiración y drenaje que se produce durante la operación del relleno sanitario. De esta forma se puede evaluar el potencial de generación de líquidos percolados bajo diferentes alternativas de diseño, para seleccionar y dimensionar sistemas de recolección adecuados y sistemas de tratamiento de los mismos.

Para su utilización, se requiere básicamente tres tipos de datos de entrada: clima, suelo y del diseño mismo del relleno sanitario a evaluar. Los datos climáticos o meteorológicos requeridos se clasifican en cuatro grupos: evapotranspiración, precipitación, temperatura y radiación solar de la zona en la cual se ubica el relleno sanitario. El programa permite tanto la entrada de datos históricos (los cuales se deben presentar como registros diarios); propiedades estadísticas de los datos históricos (que permiten al programa generar datos que describen un escenario climático de la zona); o elegir dentro de su base de datos la estación meteorológica más cercana a la ubicación del proyecto.

### 3) Método Suizo

El método suizo permite estimar de manera rápida y sencilla el caudal de lixiviado o líquido percolado mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{1}{t} P \times A \times k$$

Dónde:

Q	=	Caudal medio de lixiviado (l/s)
P	=	Precipitación media anual (mm/año)
A	=	Área superficial del relleno (m <sup>2</sup> )
T	=	Número de segundos en un año (31536000 s/año)
K	=	Coficiente que depende del grado de compactación de la residuos sólidos, cuyos valores recomendados son los siguientes:

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

Para rellenos fuertemente compactados con peso específico > 0.7 Ton/m<sup>3</sup>, se estima una generación de lixiviado entre 15 y 25% (K= 0.15 a 0.25) de la precipitación media anual correspondiente al área del relleno.

#### Cálculo de la generación de lixiviado método suizo

Primeramente tomamos el dato de cantidad de residuos sólidos que serán depositados en los próximos 5 años en el relleno sanitario.

Luego se consideran una serie de supuestos obtenidos por experiencias en rellenos sanitarios y revisión bibliográfica, los cuales se resumen en la siguiente tabla:

Variables utilizadas	Valor
Densidad de ingreso de los residuos	0.5 Ton /m <sup>3</sup>
Humedad de ingreso de los residuos	45%
Densidad inicial de compactación	0.7 Ton/m <sup>3</sup>
Humedad inicial de compactación	25, 7 %
Densidad final de compactación	0.9 Ton /m <sup>3</sup>
Humedad final de compactación	20%

En el área de relleno se produce una diferencia del porcentaje de humedad, lo que corresponde al líquido liberado producto de la capacidad de compactación que experimentan los residuos, de los cuales el 40% de ellos son percolados, mientras que el otro 60% se recupera en el esponjamiento de los residuos y es utilizado en su degradación. Con este criterio, se espera que en cinco años de compactación se llegue a una densidad de 0,9 Ton/m<sup>3</sup>, y a una humedad de 20%. Con la aplicación del siguiente cuadro se determina el volumen de lixiviado que se generara por la humedad de los residuos.

**Cuadro 5.8: Cálculo de la Generación de Lixiviado por la Humedad Propia de los Residuos Sólidos**

Residuos para el año 1	Periodo De descomp. en 5 años	Cantidad Ton/Año	Densidad de los Residuos D	Volumen Residuos Sólidos V	% de Humedad Inicial HI	% de Humedad Final HF	Diferencia de Humedades H (HI-HF)	Volumen de Líquido liberado por los Residuos VL= (V*H)	Volumen que Percola como Lixiviado VLP=VL*40%
	1	73.000	0,70	104.286	0,45	0,35	0,10	10.429	4.171
	2	73.000	0,75	97.333	0,35	0,25	0,10	9.733	3.893
	3	73.000	0,80	91.250	0,25	0,22	0,03	2.738	1.095
	4	73.000	0,85	85.882	0,22	0,21	0,01	859	344
	5	73.000	0,90	81.111	0,21	0,20	0,01	811	324

Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS

Es importante aclarar que la mayor generación de lixiviados por compactación, degradación de los residuos orgánicos al interior del relleno sanitario generalmente se da en los 2 primeros años de vida del relleno sanitario, no obstante considerando que estos lixiviados tienen que percolar por las capas de residuos y el drenaje interno del relleno sanitario serán visibles a partir del tercer año de vida útil.

La suma de la generación de lixiviados por la precipitación pluvial y la generación por descomposición y humedad de los residuos nos da un valor tentativo para realizar los cálculos para el dimensionamiento de los sistemas de recolección, almacenaje y tratamiento de dichos lixiviados. En el Anexo 1 se presenta una metodología para la estimación de la Generación de Lixiviados en Relleno Sanitario.

Al respecto del diseño de los sistemas de captación y piscinas para el almacenamiento de lixiviados previo a su tratamiento puede verse el capítulo 6.

### 5.5.3 Manejo y Tratamiento de Lixiviados<sup>22</sup>

La remoción de los distintos contaminantes presentes en los lixiviados, DQO, DBO<sub>5</sub>, Compuestos Orgánicos Volátiles, Amonio, y metales pesados, hace necesario emplear combinaciones de los tratamientos habitualmente empleados en la depuración de lixiviados.

Los lixiviados contienen los mayores grupos de contaminación como son:

- ✓ Contaminación por patógenos
- ✓ Contaminación por materia orgánica
- ✓ Contaminación por nutrientes
- ✓ Contaminación por sustancias tóxicas

En algunos casos la remoción de uno de los grupos de contaminación se ve impedido por la presencia del otro, tal es el caso de la remoción de la materia orgánica y los metales pesados.

Existen diferentes métodos de control para el manejo y tratamiento de los lixiviados generados, como la evaporación, estabilización, recirculación, procesos biológicos, procesos fisicoquímicos y tecnologías de membranas. Su aplicación, básicamente dependerá de la cantidad y características del líquido que se genera y los costos de tratamiento que implica.

A modo referencial en el siguiente cuadro se muestra el tipo de tratamiento aplicable al tipo de relleno sanitario:

<sup>22</sup> Análisis Comparativo de Tecnologías para el Tratamiento de Lixiviados en Rellenos Sanitarios, Noeggerath I, Salinas M, Universidad Veracruzana, 2011.

**Cuadro 5.9: Tratamiento de Lixiviados por tipo de rellenos sanitarios**

Tipo de Relleno Sanitario	Primario		Biológicos		Terciario	
	Recirculación	Laguna de Estabilización	Anaeróbicos	Aeróbicos	Fisicoquímicos	Membranas
Relleno Manual	X	X				
Relleno Semimecanizado	X		X	X		
Relleno Mecanizado			X	X	X	X

Fuente: MMyA/VAPSB/DGGIRS

### 5.5.3.1 Procesos anaeróbicos

Las tecnologías más comunes para la remoción de materia orgánica, de los lixiviados son los procesos biológicos de tratamiento, que tienen por objetivos: la estabilización de la materia orgánica, la coagulación y eliminación de los sólidos, la reducción del contenido orgánico y la reducción de la concentración del nitrógeno.

Para el caso de un lixiviado joven, en especial lixiviados de rellenos con altos contenidos de la Materia Orgánica Fácilmente Biodegradable (MOFBD), los altos contenidos de materia orgánica por lo general son apropiados para la aplicación de los procesos anaerobios de tratamiento.

Los procesos biológicos se realizan mediante microorganismos, que actúan sobre la materia orgánica e inorgánica, suspendida, disuelta y coloidal existente en el agua residual, transformándola en gases y materia celular flotante, que puede separarse fácilmente mediante sedimentación.

Existen diversos métodos de tratamiento ya sea mediante lagunas anaerobias, sistemas de nitrificación y desnitrificación, filtros anaerobios y reactores UASB (Reactor Anaerobio de flujo ascendente).

En términos de reducción de DBO se reportan altas eficiencias a cargas razonables, sin embargo usualmente requieren un pre tratamiento como los sistemas aerobios mediante lodos activados. Tienen el inconveniente de no poder eliminar la DQO no biodegradable. Los altos contenidos de amoníaco y de minerales disueltos pueden generar problemas de toxicidad para los microorganismos, por lo cual requieren de una remoción previa del amoníaco o la aplicación de cargas de trabajo reducidas debido a las limitaciones en la actividad microbiana por motivo de la toxicidad. La acumulación de material precipitado dentro del reactor, forma incrustaciones que limitan el volumen activo del reactor, la actividad de los lodos y taponan los sistemas de conducciones de los reactores.

#### **Lagunas Anaerobias**

Las lagunas anaerobias se utilizan normalmente como primera fase en el tratamiento de aguas residuales urbanas o industriales con alto contenido en materia orgánica biodegradable.

Como su nombre indica, en las lagunas anaerobias se produce la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. El objetivo primordial de estas lagunas es la reducción del contenido en sólidos y materia orgánica del agua residual, y no así la obtención de un efluente de alta calidad, razón por la que operan en serie con lagunas facultativas y de maduración. Generalmente se utiliza un sistema compuesto por al menos una laguna de cada tipo en serie, para asegurar que el efluente final de la planta depuradora va a poseer una calidad adecuada durante todo el año.

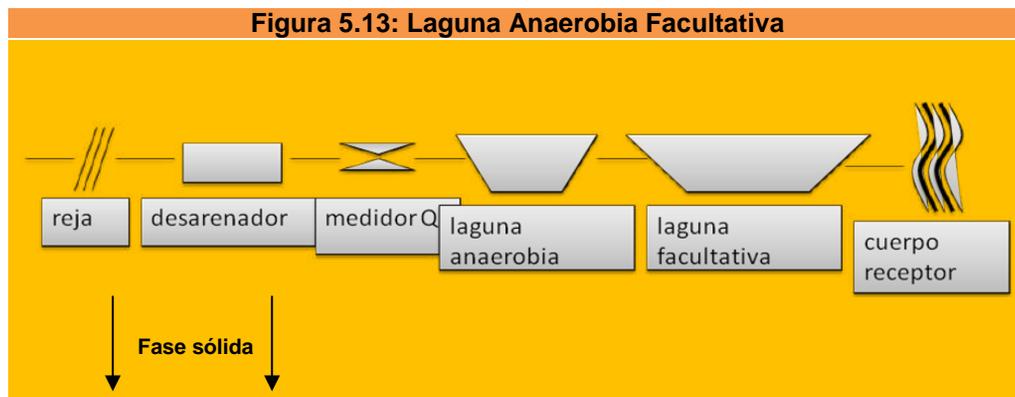
La estabilización se da mediante las siguientes etapas:

**Hidrólisis.-** Esté término indica la conversión de compuestos orgánicos complejos e insolubles en otros compuestos más sencillos y solubles en el agua. En esta etapa se suministran los compuestos orgánicos necesarios para la estabilización anaerobia de forma que puedan ser utilizados por las bacterias en las siguientes etapas.

**Formación de Ácidos.-** Los compuestos orgánicos sencillos generados en la etapa anterior son utilizados por las bacterias generadoras de ácidos. Como resultado se produce su conversión en ácidos orgánicos volátiles. Esta etapa la pueden llevar a cabo bacterias anaerobias o facultativas. Hay una gran variedad de bacterias capaces de efectuar la etapa de formación de ácidos; esta conversión ocurre con gran rapidez. Dado que estos productos del metabolismo de las bacterias formadoras de ácido o acidogénicas están muy poco estabilizados en relación con los productos de partida, la reducción de DBO<sub>5</sub> o DQO en esta etapa es pequeña.

**Formación de metano.-** Una vez que se han formado los ácidos orgánicos volátiles, una nueva categoría de bacterias entra en acción, y los utiliza para convertirlos finalmente en metano y dióxido de carbono. La liberación de estos gases es responsable de la aparición de burbujas, que son un síntoma de buen funcionamiento en las lagunas anaerobias. Esta fase de la depuración anaerobia es fundamental para conseguir la eliminación de materia orgánica, ya que los productos finales no contribuyen a la DBO<sub>5</sub> o DQO del medio. A diferencia de lo que ocurría con la fase acidogénica, hay pocos microorganismos capaces de desarrollar la actividad metanogénica, su metabolismo es más lento y además, son mucho más sensibles a distintas condiciones ambientales.

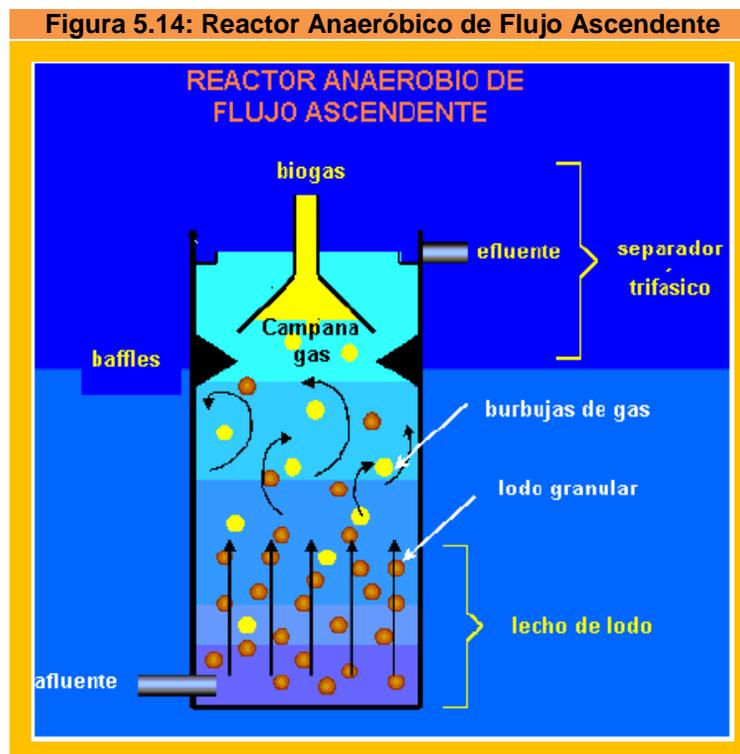
Las bacterias metanogénicas mueren en presencia de oxígeno disuelto y son muy sensibles al pH. En la segunda fase de la digestión anaerobia, si no existe en el medio un número adecuado de bacterias metanogénicas que transformen estos productos, y se produce su acumulación y el pH disminuye. Se estima que para valores de pH inferiores a 6,8 la actividad metanogénica comienza a presentar problemas, y que por debajo de pH=6,2 se detiene completamente, cuando esto ocurre se liberan no sólo ácidos orgánicos que pueden tener olores desagradables, sino otros compuestos como ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), mercaptanos o escatol, que son los responsables principales de los olores que indican funcionamientos deficientes en las lagunas anaerobias.



### Reactor UASB

El reactor anaerobio de flujo ascendente, UASB, (Upflow Anaeróbio Sludge Blanket). Su principio de funcionamiento se basa en la buena sedimentabilidad de la biomasa producida dentro del reactor, la cual se aglomera en forma de granos o flóculos, presentando una elevada actividad metanogénica, lo que explica los buenos resultados del proceso. Tienen una configuración que permite que el agua ingrese por el fondo del reactor y siga una trayectoria ascendente. En su paso el reactor tiene dos zonas definidas: la zona de digestión donde hay presencia de materia orgánica mezclada con el lodo anaerobio y la zona de sedimentación.

Las concentraciones de biomasa de la zona de digestión que se desplaza en la vertical del reactor, permiten el funcionamiento a alta carga orgánica con tasas altas de eliminación. La biomasa activa puede estar en forma de gránulos compactos o en forma de lodos floculentos con buena sedimentabilidad lo cual convierte en su característica principal la retención de la biomasa sin necesidad de soporte.



Fuente: <http://microbiologia-general.blogspot.com/>

La puesta en marcha del reactor UASB es rápida si cuenta con el inoculo apropiado y fácilmente adaptado a la composición del agua residual a tratar. Las principales condiciones que se deben encontrar en estos reactores son:

- ♻️ Efectiva separación del biogás, desagüe y lodo.
- ♻️ El lodo anaeróbico, debe presentar buena capacidad de sedimentación y principalmente, se debe desarrollar como un lodo granulado. El periodo de puesta en marcha antecede a la granulación.
- ♻️ El desagüe debe ser introducido por la parte inferior del reactor.
- ♻️ El gas producido es impedido de ingresar dentro de los sedimentadores, a través de los deflectores. En la parte inferior del reactor se forma un estrato de lodo biológico, denominado manto de lodo, con características superiores de decantación y actividad biológica, favorecida por las condiciones físicas y químicas impuestas al sistema. Este lodo posee gran concentración de microorganismos activos, que degradan la materia orgánica con elevada eficiencia, a tiempos de retención hidráulica. El sistema no necesita de agitación mecánica y de aireación, se mantiene estable y capaz de resistir fuerzas de agitación relativamente altas, haciendo que el lodo permanezca en el reactor. El residuo pasa primero por este manto de lodo formado, donde la materia orgánica sufre un proceso de degradación, dando origen a la producción de biogás (mezcla de gases  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y otros) lodo mineralizado y nuevas bacterias. El efluente tratado, más los sólidos, que conforman una porción de lodo; pasan al

decantador localizado en la parte superior del reactor. Los sólidos decantan y retornan por gravedad al lecho del digestor, líquidos y gases, y son dirigidos a compartimientos distintos.

- ♻️ El biogás producido se dirige al compartimiento de salida de gases y su posterior aprovechamiento; entre tanto el exceso de lodo que se acumuló en el fondo del reactor es retirado periódicamente.

En términos de las reducciones de  $DBO_5$  se reportan muy altas eficiencias a cargas razonables. Usualmente se usan para llegar a niveles de tratamiento secundario, pero cuando se requieren eficiencias superiores se utilizan como pre tratamiento, precediendo a sistemas aerobios como los lodos activados.

Las principales ventajas que tienen los procesos anaerobios en este contexto son:

- ♻️ La mayor simplicidad en el sistema de tratamiento.
- ♻️ La menor producción de lodos.

Esto se refleja en menores costos de inversión de capital y de operación y mantenimiento, y en menores requisitos técnicos en el personal que opera el sistema.

Sin embargo, existen varias precauciones que hay que tener en cuenta al aplicar este tipo de procesos. Los altos contenidos de amoníaco y de minerales disueltos pueden generar problemas de toxicidad para los microorganismos. Esto implicaría una remoción previa del amoníaco en caso de que este fuera el problema, o la aplicación de cargas de trabajo reducidas debido a las limitaciones en la actividad microbiana por motivo de la toxicidad. El mayor problema es la acumulación significativa de material inorgánico precipitado dentro del reactor y en los lodos mismos del sistema anaerobio. La acumulación de material precipitado dentro del reactor termina por formar incrustaciones que limitan el volumen activo del reactor, limitan la actividad de los lodos, y taponan los sistemas de conducciones de los reactores acabando finalmente en un colapso del sistema de tratamiento en costos y complicaciones muy grandes en la operación y mantenimiento de las plantas.

Bajo estas consideraciones, es necesario previamente aplicar pretratamientos que minimicen los efectos de la toxicidad y/o de los materiales incrustantes o trabajar con diseños de reactores anaerobios que sean más resistentes a estos fenómenos. Igualmente debe tenerse en cuenta que las variaciones de los caudales y cargas orgánicas en sistemas como los reactores UASB pueden fácilmente desestabilizar el proceso y por lo tanto con frecuencia se puede requerir una homogenización de los caudales si se esperan variaciones significativas en los flujos y cargas.

A continuación, se describe el sistema primario aplicable a estos tipos de tratamiento:

- i) Los sistemas primarios tienen la función de preparar el líquido percolado, homogenizando y limpiándolas de todas aquellas partículas cuyas dimensiones puedan obstruir o dificultar los procesos consecuentes. Estos tratamientos son: homogenización, rejillas y desarenador.
  - ✓ **Homogeneización:** El proceso de homogeneización es necesario para corregir diferencias en cuanto a concentraciones de materia orgánica, metales y otro tipo de contaminantes, además, para obtener un flujo de entrada que pueda manipularse sin un constante control. El ajuste de pH y las deficiencias presentadas, se pueden modificar mediante la aplicación de soluciones ácidas o básicas.
  - ✓ **Rejillas:** Las rejas o cribados permiten la filtración de los sólidos gruesos presentes en los líquidos. Esta etapa es indispensable ya que con esta se logra proteger los procesos siguientes del taponamiento y obstrucción por materiales gruesos.
  - ✓ **Desarenador:** El sistema más utilizado para extraer la arena que va por dentro de los líquidos es el desarenador de flujo horizontal. Los sólidos inorgánicos como arenas, cenizas y grava, a los que se les denomina "arenas" varían en cantidad, dependiendo

de factores geológicos y características del tipo de residuo. El desarenador está conformado por un canal en donde la partícula se separa del líquido por gravedad. La eficiencia esperada en términos de Sólidos Suspendidos es del 10%.

### **Nitrificación – Desnitrificación**

Otro tipo de tratamiento anaeróbico, pero menos aplicado es la nitrificación y des nitrificación. Tiene como ventajas: Alta remoción de  $DBO_5$ , alta remoción de nitrógeno total, lodos en exceso estabilizados y una buena sedimentación biomasa.

#### **5.5.3.2 Procesos aeróbicos**

Se utilizan cuando se requiere obtener una baja concentración de  $DBO_5$  en los efluentes. Existe experiencia con una gran variedad de tipos de sistemas, desde las tradicionales lagunas aireadas, hasta sofisticados sistemas que acoplan reactores biológicos con procesos de ultrafiltración con membranas. Su rango de aplicación es conocido al igual que los problemas y limitaciones que pueden surgir en su aplicación.

Como usualmente las concentraciones de  $DBO_5$  en los lixiviados son muy altas es relativamente fácil tener remociones porcentuales superiores al 90% en este parámetro. Sin embargo la  $DBO_5$  remanente puede ser todavía alta. Los costos de inversión y de operación y mantenimiento son significativamente superiores a los procesos anaerobios cuando los lixiviados son concentrados, como es el caso de un lixiviado joven, por lo que se logran mejores relaciones beneficio / costo cuando se utilizan para tratar lixiviados con concentraciones medias o bajas de  $DBO_5$ . Por esta razón, y dependiendo de las exigencias del vertimiento, se usan preferencialmente como pos tratamiento a los sistemas anaerobios, o para lixiviados viejos con bajos niveles de  $DBO_5$ .

Por lo general, se reportan problemas con la generación de espumas, con la precipitación de hierro, y en el caso de los lodos activados, problemas para aceptar altas variaciones en las cargas hidráulicas y orgánicas de los lixiviados. Esto último puede implicar que los sistemas requieran tanques de ecualización de caudales como parte del tratamiento. Igualmente, y dependiendo de la forma de operación del proceso, se tiene una alta generación de lodos residuales en mayor cantidad que los procesos anaerobios, que es necesario procesar aumentando los costos de inversión, operación y mantenimiento.

Por otra parte, en casos en donde los lixiviados aporten cantidades importantes de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's), el aire que se usa en el proceso de la aireación del tanque biológico debe ser tratado a su vez para remover los COV's que se arrastran. Los métodos para el control de los COV's pueden ser:

- ✓ Oxidación térmica.
- ✓ Oxidación catalítica.
- ✓ Absorción.
- ✓ Adsorción.
- ✓ Condensación.

No obstante, este tipo de controles, hacen más compleja la operación de los sistemas de tratamiento y puede aumentar los costos. Por la naturaleza misma del proceso que se tiene, la operación de un proceso aerobio requiere mayor capacidad técnica por parte del operador, al igual que mayor necesidad de mantenimiento de equipos.

### **Lagunas aireadas mecánicamente**

Las lagunas aireadas mecánicamente son reservorios con poca profundidad (entre 2,5 a 5,0 m), donde la aireación mecánica se mantiene por medio de aireadores fijos o flotantes. De acuerdo

con la cantidad de energía transferida por los aireadores por unidad de volumen de las lagunas, los sólidos presentes se sedimentan o no en el fondo de la laguna.

Las lagunas aireadas mecánicamente son semejantes a las lagunas de estabilización, con la diferencia de que están dotadas de equipos de aireación, cuya principal finalidad es introducir oxígeno a la masa líquida.

De acuerdo con la utilización de los sólidos es posible caracterizar tres tipos de lagunas:

- ✓ Lagunas aireadas facultativas.
- ✓ Lagunas aireadas aerobias con sólidos suspendidos.
- ✓ Lagunas aireadas con recirculación de sólidos.

Los lixiviados son vertidos directamente a la laguna después de pasar por un tratamiento preliminar (rejillas y desarenación). Funcionan como un tanque de aireación, en el cual la aireación artificial sustituye el oxígeno natural que se produce por medio de las algas en las lagunas de estabilización.

Debido a su mayor profundidad y al menor tiempo de retención para la estabilización de la materia orgánica, el área que ocupa es menor frente a las lagunas de estabilización.

Se necesita energía eléctrica en las cercanías del área donde se construyen las lagunas aireadas mecánicamente, debido al uso de los aireadores.

Las lagunas aireadas pueden clasificarse en tres tipos.

- ✓ Aerobia con mezcla completa.
- ✓ Facultativa.
- ✓ Con aireación extendida.

Las más usadas son las 2 primeras. La tercera tiene un costo más elevado que las anteriores y su operación es más compleja, con mayor consumo de energía eléctrica.

La biología de las lagunas aireadas mecánicamente es muy semejante a la de los procesos de lodos activados y la mayoría de los microorganismos presentes son comunes en ambos sistemas de tratamiento.

El tratamiento de los lixiviados en las lagunas aireadas tiene como base la formación de flóculos biológicos que quedan suspendidos en la capa aerobia por la turbulencia causada por los aireadores. La aireación continua es necesaria para las actividades respiratorias de los microorganismos aerobios presentes y también para mantener los flóculos suspendidos y, de esta forma garantizar un contacto permanente entre ellos y la materia orgánica de los lixiviados.

### **Lodos activados**

El lodo activado es un proceso de tratamiento por el cual el agua residual y el lodo biológico (microorganismos) son mezclados y aireados en un tanque denominado reactor. Los flóculos biológicos formados en este proceso se sedimentan en un tanque de sedimentación, luego son recirculados nuevamente al tanque aireador o reactor.

En el proceso de lodos activados los microorganismos son completamente mezclados con la materia orgánica de los lixiviados de manera que ésta les sirve de sustrato alimenticio. La mezcla o agitación se efectúa por medios mecánicos superficiales o sopladores sumergidos los cuales tienen doble función:

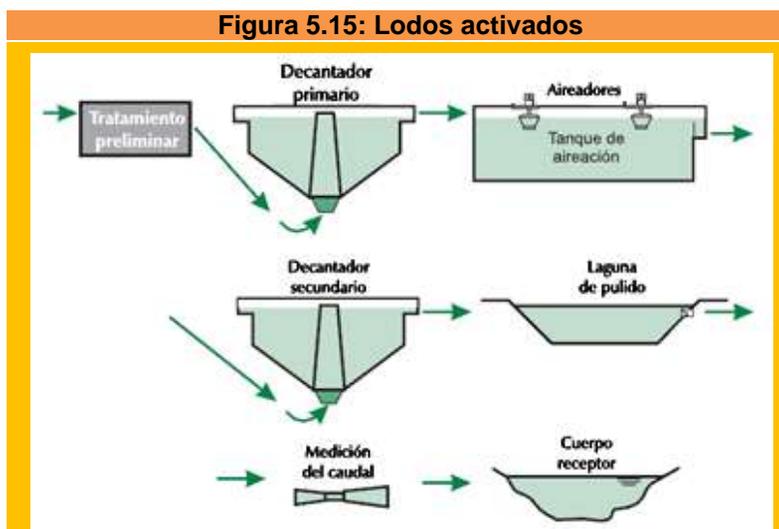
- ✓ Producir mezcla completa y,
- ✓ Agregar oxígeno al medio para que el proceso se desarrolle.

Los elementos básicos de las instalaciones del proceso de lodos activados son los siguientes:

- ♻️ Tanque de aireación. Estructura donde el desagüe y los microorganismos (incluyendo retorno de los lodos activados) son mezclados.
- ♻️ Tanque sedimentador. El desagüe mezclado procedente del tanque es sedimentado separando los sólidos suspendidos (lodos activados), obteniéndose un desagüe tratado clarificado.
- ♻️ Equipo de inyección de oxígeno. Para activar las bacterias heterotróficas.
- ♻️ Sistema de retorno de lodos. El propósito de este sistema es el de mantener una alta concentración de microorganismos en el tanque de aireación.
- ♻️ Una gran parte de sólidos biológicos sedimentables son retornados al tanque de aireación.
- ♻️ Exceso de lodos y su disposición. El exceso de lodos, debido al crecimiento bacteriano en el tanque de aireación, son eliminados, tratados y dispuestos.

En algunos casos los lixiviados deben ser acondicionados antes de pasar al proceso de lodos activados, debido a que ciertos elementos inhiben el proceso biológico. Algunos de estos casos son:

- ♻️ Sustancias dañinas a la activación microbiana tal como la presencia de cloro.
- ♻️ Grandes cantidades de sólidos. Se utilizan cribas o rejas en un tanque de sedimentación primaria para los sólidos fácilmente sedimentables.
- ♻️ Lixiviados con valores anormales de pH. Se debe realizar un proceso de neutralización el cual es indispensable para el desarrollo bacteriano.
- ♻️ Desagües con grandes fluctuaciones de caudal y calidad de lixiviados incluyendo concentración de DBO5. Se homogeneiza las aguas en un tanque de igualación.



**Fuente:** Manual de Gestión Integrada de Residuos Municipales en ciudades del Caribe y América Latina, 2006

### 5.5.3.3 Sistemas naturales

Los sistemas naturales, lagunas y humedales artificiales, también son alternativas para el tratamiento de lixiviados, este tipo de tratamientos pueden aplicarse en rellenos sanitarios manuales. Tienen la ventaja de la simplicidad en su operación, y la posibilidad de lograr diferentes niveles de tratamiento, desde un pretratamiento hasta un tratamiento terciario en caso de necesitarse.

La combinación de las lagunas y los humedales puede manejar adecuadamente problemas comunes como la acumulación de precipitados, la formación de espumas, la toxicidad a los microorganismos y algunas variaciones en cargas hidráulicas y orgánicas. Esto se logra al tener tiempos de retención hidráulica muy altos y volúmenes de procesos igualmente grandes, que permiten acomodar

variaciones en caudal, acumulaciones de precipitados junto con una baja producción de gases y por lo tanto de espumas.

La principal desventaja que se tiene con estos sistemas es la cantidad de terreno que requiere para realizar los procesos.

### **Lagunas de Estabilización**

Una de las formas de tratamiento más usual, es el uso de lagunas en las que se descargan el efluente lixiviado después de pasar por una rejilla manual o criba mecánica. Este método se conoce también como tratamiento aeróbico.

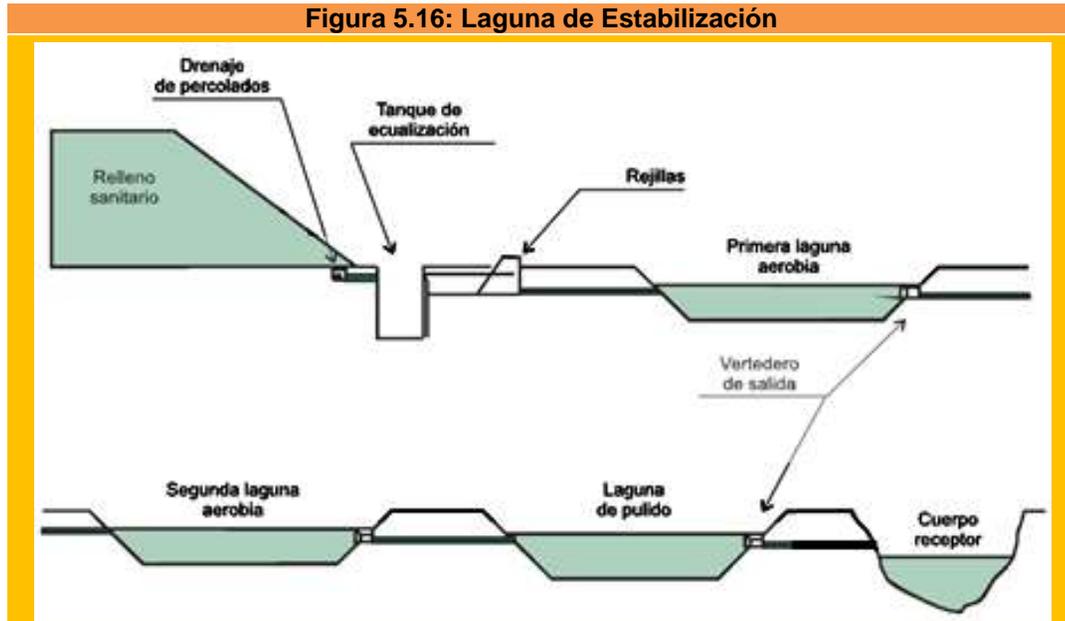
En las lagunas de estabilización, la remoción de la materia orgánica (expresada en  $DBO_5$ ) se realiza a través de procesos biológicos aerobios y anaerobios. Dependiendo del proceso predominante, las lagunas son aerobias (de maduración o pulimento), anaerobias o facultativas

Por lo general, las lagunas aeróbicas de estabilización tienen las siguientes características básicas: forma – troncopiramidal; profundidad – 1,5 m y tiempo de retención – 25 días como mínimo.

En una serie de lagunas, el efluente recibe un pulido final en una laguna pequeña, que también es aerobia y tiene las mismas características físicas de las dos anteriores, pero con capacidad de retener el efluente durante 7 días.

Se deben tratar los márgenes de las lagunas para evitar que crezca vegetación en la interface aire-efluente. Además, se debe retirar el lodo periódicamente, para no afectar la eficiencia del tratamiento.

El lodo retirado debe ser dispuesto en un lecho de secado, para luego ser incorporado al interior del relleno sanitario, mientras que la fracción líquida puede ser desechada directamente en el cuerpo receptor.



Fuente: Manual de Gestión Integrada de Residuos Municipales en ciudades del Caribe y América Latina, 2006

#### **5.5.3.4 Evaporación Natural y Evaporación Térmica**

La evaporación consiste en utilizar la energía que se tiene en el biogás del relleno sanitario para evaporar el lixiviado por calentamiento.

## Evaporación Natural

Las lagunas de evaporación consisten en sistemas de carácter permanente, de doble impermeabilización, por cada zona, conformado por dos niveles de geomembranas, con un geonet entre ambas capas y un nivel basal de arcilla.

El sistema se basa exclusivamente en el éxito del almacenamiento y evaporación, basado en las producciones más bajas que las usuales en rellenos de tecnología de celdas.

La operación de la laguna se orienta a maximizar la evaporación, por lo cual se concentra su uso en los meses de verano. Durante los meses de invierno la parte hidráulica de aguas de lluvias es complementada con otra laguna destinada a dichos fines. El programa de monitoreo se enfoca a la evaluación de la eficiencia del proceso de evaporación, mediante la medición de los niveles de líquido en las lagunas, el monitoreo de variables climatológicas y sistemas de registro en terreno para indicar operaciones.

La evaporación natural se aprovecha en dos formas:

- ✓ Riego con rociadores (sprinklers) en el área de la residuos sólidos
- ✓ Lagunas de evaporación (almacenamiento/evaporación)

El rociado de lixiviado sobre la masa de residuos debe realizarse durante la estación no lluviosa, pues durante la época de lluvias el líquido generado se acumula en sistemas de lagunas y luego en los meses de verano es evaporado utilizando las técnicas indicadas anteriormente. El propósito es lograr que el sistema entre en equilibrio.

Para áreas áridas las lagunas de acumulación, pueden volverse lagunas de evaporación.

## Evaporación Térmica

En esta alternativa, el lixiviado se almacena en un estanque o laguna de evaporación cuya tasa de evaporación depende las condiciones climáticas. En caso que hubiera una época de lluvias intensas, el estanque debe estar diseñado para retener el volumen asociado de líquido. La tasa de evaporación puede aumentarse al rociar el lixiviado sobre la superficie del relleno sanitario en funcionamiento y sobre las áreas terminadas. Aunque el rociado aumenta la tasa de evaporación, el proceso puede generar olores y aerosoles.

La evaporación también puede aumentarse a través de un intercambiador de calor, en este caso el efluente líquido es enviado a un tanque (evaporador), donde es calentado a una temperatura de 80 a 90 °C, lo que hace que una parte de la fracción líquida se evapore, de modo que se concentra el contenido de sólidos. El vapor caliente, al salir del evaporador, pasa por un filtro que retiene la humedad y sigue hacia una cámara de calentamiento final, de donde es lanzado, seco a la atmósfera. El lodo, ya más denso, con un 30% de material sólido, sale por la parte inferior del evaporador y es dispuesto en el relleno. La gran ventaja es que el combustible usado para evaporar el efluente líquido es el biogás captado en el mismo relleno sanitario.

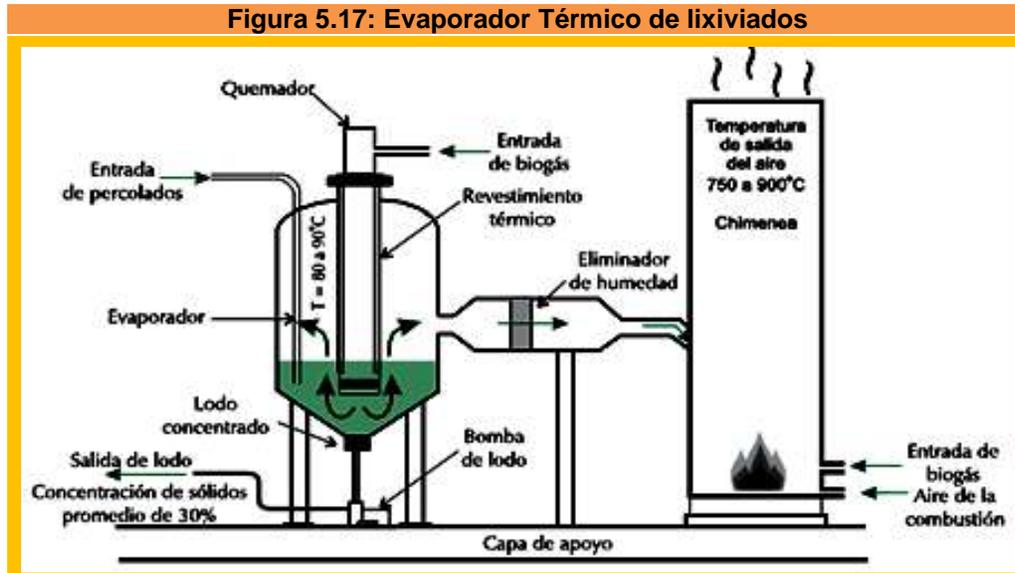
### 5.5.3.5 Recirculación

Otra forma común de tratamiento del lixiviado es mediante la recirculación al interior de la masa de residuos usando aspersores, camión cisterna o lechos de infiltración. Este proceso es recomendable para municipios con balance hídrico negativo, es decir, donde el índice de evaporación es mayor al de precipitación pluvial. También puede ser usado durante la época seca, como procedimiento auxiliar del método de uso.

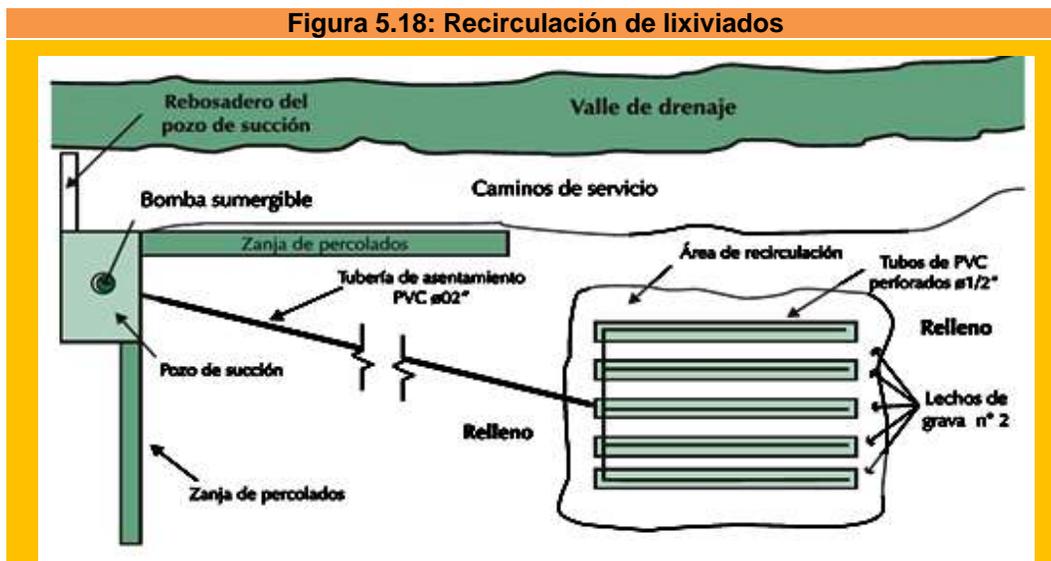
En este proceso, el efluente líquido va perdiendo su toxicidad (carga orgánica básicamente) por la aireación y por la acción biológica de los microorganismos presentes en la masa de residuos. Las

dimensiones de la laguna de lixiviados, debe tener capacidad suficiente para almacenar una gran cantidad de este líquido, a fin de evitar que la bomba de recirculación se ponga en funcionamiento a intervalos muy cortos. Además, parte del efluente recirculado se evapora, por lo que es importante que las boquillas aspersores sean reguladas para trabajar como vaporizadores, a fin de aumentar la tasa de evaporación.

Las desventajas de este proceso están relacionadas con el gran consumo de energía eléctrica y con la dependencia del buen suministro de energía y funcionamiento del conjunto de la motobomba, puesto que el mal suministro o falla del equipo podría afectar cualquier cuerpo de agua y producir daños al medio ambiente.



Fuente: Manual de Gestión Integrada de Residuos Municipales en ciudades del Caribe y América Latina, 2006



Fuente: Manual de Gestión Integrada de Residuos Municipales en ciudades del Caribe y América Latina, 2006

### 5.5.3.6 Procesos Físicoquímicos

Los tratamientos físico-químicos son utilizados básicamente para: eliminar sólidos en suspensión; coloides, metales pesados y otros compuestos tóxicos. Se fundamenta en los procesos de coagulación – floculación y la producción de compuestos insolubles de metales pesados.

Los procesos coagulación-floculación y flotación consisten en la remoción de partículas suspendidas mediante la adición de sustancias químicas (coagulantes). Los procesos de adsorción y de oxidación intensiva pueden remover tanto partículas suspendidas como disueltas.

Para el tratamiento físico-químico de los lixiviados puede aplicarse la coagulación con cloruro férrico a un pH elevado o la precipitación con los hidróxidos de calcio o sodio con lo cual cambia el olor de los lixiviados. También se elimina el color, la opacidad y los contenidos de materia orgánica y de metales, lo que facilita su manejo y disposición. No obstante, el tratamiento físico-químico de los lixiviados produce gran volumen de lodos que deben ser depositados de nuevo en el relleno sanitario.

### 5.5.3.7 Sistemas de Membranas

La tecnología del tratamiento de lixiviados utilizando membranas comprende la micro filtración la ultrafiltración, la osmosis inversa. Entre los tratamientos más empleados son: Bioreactores con membrana y la Osmosis Inversa

#### Bioreactores con membrana

Los Biorreactores con membrana se utilizan de la misma manera como se utilizan los sistemas biológicos de tratamiento, siendo la principal diferencia la sustitución del sedimentador como sistema de separación sólido líquido por un sistema de micro o ultrafiltración.

#### Osmosis Inversa

La ósmosis inversa tiene rendimientos superiores al 99 % en los contaminantes habitualmente presentes en el lixiviado. El lixiviado según va recorriendo el módulo, aumenta la concentración de contaminantes. A esta corriente se le denomina “concentrado” y es recirculada dentro del mismo relleno sanitario. El agua pura extraída, denominada “permeado” es conducida a un depósito de almacenamiento para usos posteriores o vertidos al cuerpo receptor.

### 5.5.3.8 Niveles de Tratamiento

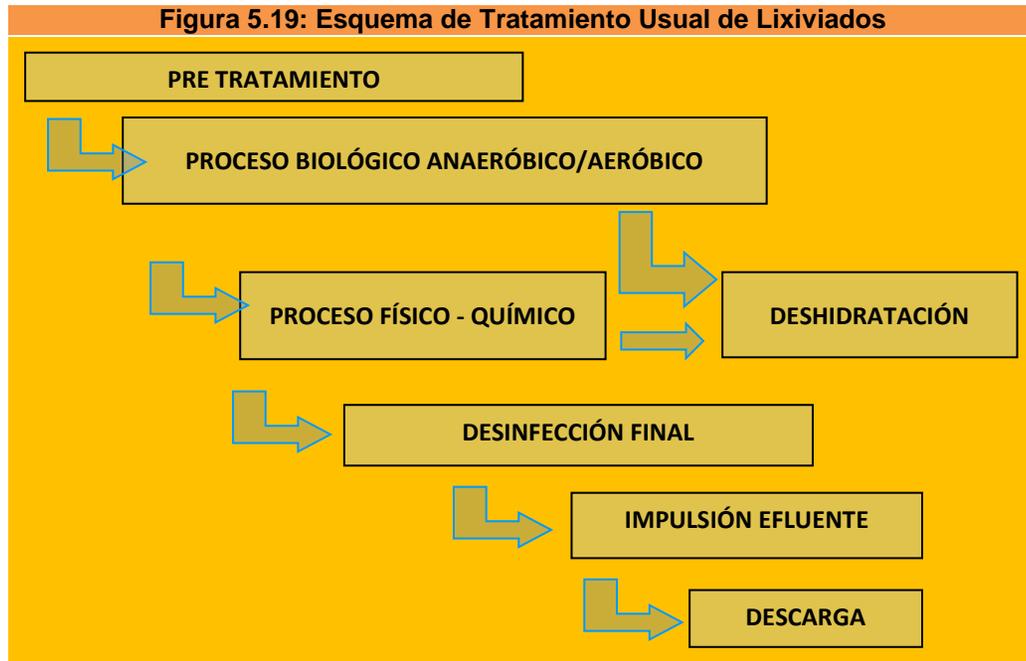
Los niveles que conforman el sistema de tratamiento se determinan por las remociones que se pueden llegar a lograr en cada una de ellos y por las características de concentración esperadas en el lixiviado a tratar. Por lo general, un sistema de tratamiento está conformado por los siguientes niveles:

**1. Tratamiento Preliminar.** Consiste en eliminar los residuos fácilmente separables y preparar el lixiviado para el tratamiento posterior, y de igual manera evitar la generación de daños a los equipos mecánicos, incrustaciones en tuberías y depósitos permanentes en tanques de los tratamientos siguientes. Para tal fin se dispone de un desarenador con la finalidad de retirar arenas y grasas del lixiviado a tratar. Aquí se retiene más del 80% de las arenas e igualmente el 80% de aceites y grasas.

**2. Tratamiento Primario.** Consiste en la remoción de una fracción considerable de los sólidos en suspensión (SST) y una fracción de la materia orgánica (DBO<sub>5</sub> y DQO).

**3. Tratamiento Secundario.** Consiste en la remoción de la materia orgánica propiamente dicha que se encuentra presente en los lixiviados, mediante procesos biológicos como anaerobios y aerobios, de tal manera que se permita una alta disminución de las altas cargas orgánicas presentes.

**4. Tratamiento Terciario.** Su finalidad es el pulimiento final. Consiste en la remoción de patógenos asegurando una calidad muy superior del efluente secundario. Este proceso permitirá que el efluente final sea utilizado en riego o en el vertimiento a la fuente receptora.



Fuente: Presentación SIREMU, Planta de Tratamiento de Líquidos Lixiviados, 2011

### 5.5.3.9 Comparación de tecnologías para el tratamiento de lixiviados

En el siguiente cuadro, se observa un resumen de las principales características y consideraciones que se deben tener en cuenta en la comparación de las tecnologías que se presentaron anteriormente.

**Cuadro 5.10: Comparación Entre Tecnologías para el Tratamiento de Lixiviados (Manejo de Características Problemáticas de los Lixiviados)**

Problemas con:	Tecnología					
	Aerobio	Anaerobio	Evaporación	Recirculación	Membranas	Sistemas Naturales
Formación de precipitados	--	---	-	--	---	-
Toxicidad a los microorganismos	--	--	No	No	No (1)	-
Formación de espuma	---	-	--	-(1)	Variable (2)	No
Emisión de COV	---	-	--	-	Variable (2)	-
Sensibilidad a variaciones de caudal	--	---	-	-	-	No
Producción de lodos	---	-	-	No	-	-
Requerimientos de área	Baja	Baja	Muy Baja	Baja	Baja	Alta

(1) Pueden formarse en los tanques de almacenamiento.

(2) Si los sistemas son aerobios, la problemática puede ser alta.

(-) Un signo negativo significa como afecta la característica al proceso en cuestión.

Fuente: Giraldo E., "Manejo Integrado de Residuos Sólidos Urbanos", 1997

En general, se puede observar que los problemas de acumulación de precipitados, emisiones de COV's, toxicidad a los microorganismos y formación de espumas afectan de manera similar a los procesos biológicos intensivos.

La viabilidad de los tratamientos biológicos, está condicionada por una serie de elementos y compuestos tóxicos para los microorganismos, que pueden inhibir las reacciones, por lo que se hace necesario un estudio detallado de las características de los lixiviados.

Las ventajas que presenta el sistema anaerobio, principalmente son: No requieren el aporte de oxígeno, existe una minimización de la producción de lodos, mayor resistencia a la concentración de elementos tóxicos, reducción de los malos olores, y particularmente se pueden tratar directamente lixiviados de elevada carga contaminante. Una ventaja adicional es que completa el proceso de degradación anaerobia iniciado en el relleno sanitario, ya que este se comporta como un gran filtro anaerobio.

Con la aplicación del sistema aerobio se obtienen buenos resultados en la eliminación de DQO, sin embargo este sistema está limitado por los problemas de toxicidad, el enorme espacio que ocupan, la sensibilidad a los cambios de temperatura, la necesidad de adición de fosfatos, los elevados gastos energéticos que conlleva la aireación y por último la gran producción de lodos.

Los sistemas naturales por su parte son tecnologías de bajo costo pero necesitan de una gran extensión de terreno y mayor tiempo de tratamiento.

El tratamiento por recirculación no es un tratamiento aconsejable cuando la pluviometría de la zona es muy elevada. Por otro lado, puede afectar en la estabilidad geotécnica del relleno y la calidad del lixiviado recirculado y pretratado.

Los tratamientos de físico-químicos son poco eficaces en la eliminación de DQO, además de presentar el problema de los altos costos debido a la utilización de reactivos químicos.

El tratamiento por evaporación puede resultar viable debido que no necesita de suministro de energía, de equipos mecánicos, sin embargo presenta como desventaja la ubicación del relleno ya que produce cierto grado de contaminación y malos olores.

En el siguiente cuadro, se observan la efectividad de los diferentes tratamientos mencionados.

Cuadro 5.11: Comparación entre tecnologías para el tratamiento de lixiviados (Rendimiento de Remoción)								
Nº	Problemas con	Rendimientos						
		Aerobio	Anaerobio	Evaporación	Recirculación	Membranas (6)	Sistemas naturales	Tratamiento en PTAR
1	Demanda Bioquímica de Oxígeno	Muy altos	Altos	Muy altos	Intermedios	Muy altos	Muy altos	Muy altos
2	Nutrientes	Altos <sup>(1)</sup>	Muy bajos	Muy altos	Bajos	No <sup>(1)</sup>	No	Variables <sup>(4)</sup>
3	Metales	Intermedios <sup>(2)</sup>	Altos	Muy altos	Intermedios	Altos	Altos	Altos
4	Compuestos Orgánicos Volátiles COV	Altos <sup>(3)</sup>	+	Muy altos	+	No <sup>(1)</sup>	+	Variables <sup>(5)</sup>
5	Patógenos	Bajos	Bajos	Muy altos	Bajos	Muy altos	Variables	Variables <sup>(4)</sup>

(1) Pueden ser altos o bajos dependiendo del diseño

(2) Cuando hay pretratamiento pueden tener remociones muy altas

(3) La remoción se hace por arrastre en el tanque de aireación. Este genera problemas de impacto ambiental

(4) Puede ser muy altos si así se requiere

(5) Puede generar problemas en las conducciones

**Fuente:** Manejo Integrado de Residuos Sólidos Urbanos, Giraldo E., 1997

## 5.6 Gases, Manejo y Tratamiento

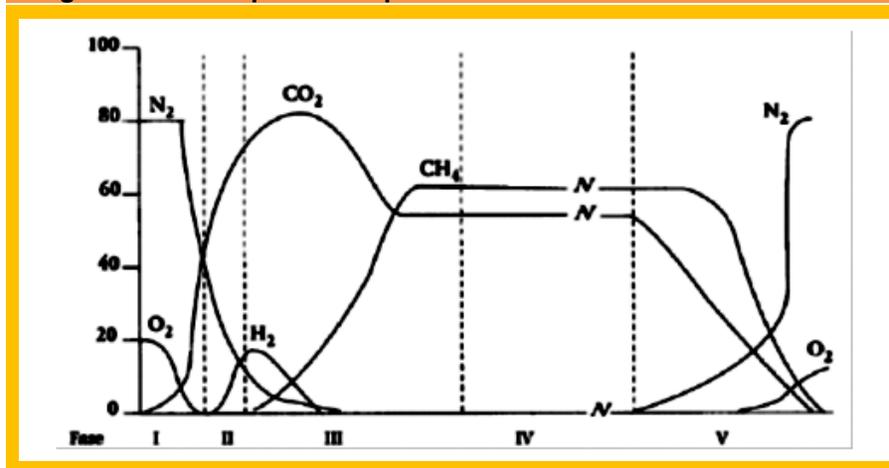
El proceso de estabilización de los residuos sólidos al interior de un relleno sanitario manual o mecanizado produce gases orgánicos, los productos finales o definitivos de la descomposición orgánica y estabilización de los residuos depositados en términos de gases son:  $\text{CH}_4$  (metano),  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  y se producen durante un largo tiempo aun después del cierre del relleno sanitario.

Un determinado volumen específico de residuos sólidos en el relleno sanitario (es decir, un volumen de control en el sentido de ingeniería) está sujeto a una serie de cambios que van desde los procesos aerobios de descomposición a los anaerobios.

El proceso de descomposición de residuos orgánicos resulta complejo y ocurre en diversas etapas de acuerdo con las condiciones del medio, determinadas por la temperatura, la presencia de oxígeno, las características del residuo y la edad del relleno sanitario, principalmente. Por lo general, se identifican cinco fases durante el proceso:

- ♻️ **Fase I:** Aeróbica, que inicia inmediatamente después de la disposición de los residuos sólidos en el relleno sanitario y en la que las sustancias fácilmente biodegradables se descomponen por la presencia de oxígeno y se propicia la formación de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), agua, materia parcialmente descompuesta, registrando temperaturas entre 35 y 40 °C.
- ♻️ **Fase II:** Aeróbica con el desarrollo de condiciones anaeróbicas en la que ocurre el proceso de Fermentación, actúan los organismos facultativos con la producción de ácidos orgánicos, se reduce significativamente el pH, se dan condiciones propicias para la liberación de metales en el agua y la generación de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).
- ♻️ **Fase III:** Anaeróbica, resultado de la acción de organismos formadores de metano ( $\text{CH}_4$ ), que en las condiciones adecuadas, actúan lenta y eficientemente en la producción de este gas mientras reducen la generación de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).
- ♻️ **Fase IV:** Metanogénica estable, que registra la más alta producción de metano oscilando entre 40-60% de metano ( $\text{CH}_4$ ) en volumen.
- ♻️ **Fase V:** Estabilización, la producción de metano ( $\text{CH}_4$ ) comienza a disminuir y la presencia de aire atmosférico introduce condiciones aeróbicas en el sistema.

**Figura 5.20: Composición óptima en una celda de relleno sanitario**



Fuente: Red de Ingeniería en Saneamiento Ambiental, II Simposio de Iberoamericano Ingeniería de Residuos, 2009

Estas fases afectan la composición del biogás y la duración de cada fase se encuentra determinada por las condiciones climáticas y los factores operativos del relleno sanitario.

Las Fases I y II pueden durar desde varias semanas hasta dos años (o más), favoreciendo el proceso de biodegradación, las altas temperaturas de aire ambiente, la alta compactación y la disposición de residuos en capas delgadas y celdas pequeñas, reduciendo el tiempo transcurrido para estas fases.

Las Fases III y IV tienen una duración aproximada de cinco años, en función de la operación del relleno sanitario y, en particular, de la cantidad de humedad de los residuos sólidos dispuestos, debido a que el alto contenido de humedad incrementará significativamente las reacciones biológicas, reduciendo el tiempo transcurrido en las Fases III y IV y, por tanto, aumentará la cantidad de biogás generado con el tiempo.

La Fase V puede tener una duración de varias décadas, para que los residuos dispuestos logren finalmente la estabilización, que depende en gran medida de las medidas adoptadas en la operación del relleno sanitario para garantizar el aumento de su tiempo de vida útil.

También durante la fase anaerobia, se producen compuestos variados de azufre y carbono, reducidos a concentraciones traza (sulfuros y ácidos orgánicos volátiles, respectivamente). El sulfuro de hidrogeno ( $H_2S$ ) es el compuesto predominante en el gas crudo del relleno sanitario y el que genera el olor característico de los rellenos o botaderos.

Los componentes del biogás que se encuentran en mayor proporción corresponden al metano y al dióxido de carbono, que en su punto máximo de generación presentan una relación 1.2:1.

Cuadro 5.12: Rango de Composición de Biogás Generados en Rellenos Sanitarios		
Parámetro	Unidad	Rango de variación
Metano	% $CH_4$	30-65
Dióxido de carbono	% $CO_2$	20-40
Nitrógeno	% $N_2$	5-40
Hidrógeno	% $H_2$	1-3
Oxígeno	% $O_2$	0-5
Argón	% Ar	0-0.4
Sulfuro de hidrógeno	% $H_2S$	0-0.01
Sulfato total	%S	0-0.01
Cloruro total	%Cl	0.005
Temperatura	C	10-40
Contenido de humedad	% humedad relativa	0-100
Masa	$Kg/m^3$	1.1-1.28
Nivel de energía mínimo	$MJ/Nm^3$	10.8-23.3

Fuente: Red de Ingeniería en Saneamiento Ambiental, II Simposio de Iberoamericano Ingeniería de Ingeniería de Residuos, 2009

Entre los gases de efecto invernadero, después del dióxido de carbono, el metano es el segundo mayor contribuyente al calentamiento global, pues el dióxido de carbono se genera en mayor cantidad; de todas formas, el potencial de calentamiento global del metano (en un horizonte temporal de 100 años) es 23<sup>23</sup> veces mayor que el del dióxido de carbono. Es por eso que en los rellenos, si el gas metano no puede ser aprovechado, se considera mejor quemarlo y convertirlo en dióxido de carbono.

### 5.6.1 Tasa y Volumen de Producción de Gases

La tasa y el volumen de producción del biogás dependen de las características de los residuos sólidos dispuestos y de las condiciones específicas que prevalecen dentro del relleno sanitario. Los parámetros que condicionan de forma prioritaria la generación de biogás son, la edad del relleno, el tipo de residuos depositados, el contenido de humedad, contenido de materia orgánica, la compactación, la granulometría, altura de las capas, el espesor de la cobertura diaria y la existencia

<sup>23</sup> Panel Intergubernamental del Cambio Climático

de recirculación de lixiviados. Las condiciones dentro del relleno sanitario pueden variar en función del tiempo, de acuerdo al diseño y la operación del relleno sanitario y a la edad de los residuos sólidos dispuestos.

Existen varios modelos para estimar la tasa de producción del gas de los rellenos sanitarios, como por ejemplo el enfoque estequiométrico de “Recovery, Processing, and Utilization of Gas from Sanitary Landfills”; este enfoque considera las dos clases principales de material que se descomponen para producir gas en el relleno sanitario:

- ✓ La primera clase es de la fracción fácilmente biodegradable (por ejemplo, residuos sólidos de alimentos, residuos de jardín).
- ✓ La segunda clase incluye la fracción menos biodegradable (por ejemplo, papeles, telas, etc.).

De acuerdo con cálculos teóricos, una tonelada de residuos sólidos municipales puede generar hasta 223 m<sup>3</sup> de biogás (107 CH<sub>4</sub> y 116 CO<sub>2</sub>). El valor energético del biogás por lo tanto estará determinado por la concentración de metano - alrededor de 20 – 25 MJ/m<sup>3</sup>, comparado con 33 – 38 MJ/m<sup>3</sup> para el gas natural.

Un metro cúbico de biogás contiene un poder calorífico de 4,230 K calorías y poder energético de 8.460 kcal.

Por su composición, el biogás es un combustible con importante poder calorífico, potencialmente aprovechable para diversos usos.

En el siguiente cuadro, se presenta el poder calorífico del biogás y de algunos otros gases.

P.C.I. en Kcal/m <sup>3</sup>	Gas
8.500	Metano
5.500	Biogás
22.000	Propano
28.000	Butano
7.600	Gas Natural

### 5.6.2 Sistema de Drenaje

El gas de relleno se puede evacuar con drenaje activo o pasivo. El drenaje activo consiste en la succión del gas mediante un soplador. El drenaje pasivo, se refiere a la difusión natural de los gases mediante chimeneas.

En el drenaje pasivo, se instala mediante un sistema de ventilación de pozos armados de piedra o tubería de PVC perforada revestida en piedra o de concreto, que a manera de chimenea, funciona atravesando en sentido vertical todo el relleno desde el fondo hasta la superficie.

La recuperación de biogás se instituye en los rellenos sanitarios por dos razones: la primera, se basa en la recuperación para controlar el gas mediante el quemado o simplemente la dilución y dispersión. La segunda razón para la recuperación de gas se basa en el aprovechamiento del contenido de energía del gas a través de la recuperación y la utilización de la misma.

### 5.6.3 Manejo del Biogás, Drenaje Activo<sup>24</sup>

En general, en los rellenos sanitarios mecanizados, por lo general con una capacidad de recepción de más de 500 Ton/día de residuos sólidos, puede considerarse la aplicación de un drenaje activo, dependiendo previamente la factibilidad financiera y tecnológica.

El manejo del biogás se concibe como un conjunto de sistemas a través de los cuales se posibilita el suministro del biogás como energético a la planta de producción o de aprovechamiento energético. Esta etapa incluye la captación, conducción, succión, limpieza, quemado de excedentes y dosificación de biogás para su suministro a la planta generadora.

Para la definición y características de estas etapas, debe identificarse las siguientes variables:

- ✓ Producción de biogás, Horizonte de producción, Composición del biogás, Temperatura, Presión y Flujo

Por otra parte la producción de energía eléctrica, comprende la operación de equipos de combustión interna, generadores, transformación del nivel de voltaje y suministro de energía eléctrica.

#### 5.6.3.1 Sistema de Captación

El sistema de captación permite el control de las emisiones de biogás y su migración a zonas aledañas cuya extensión depende altamente de la estratigrafía del terreno.

Para diseñar el sistema de captación es necesario, realizar una prueba estática y otra prueba de corto plazo. Este tipo de pruebas se utilizan para identificar la presencia y migración del biogás en el sitio y para definir la composición del mismo.

Como se analizó previamente existen varias opciones para mitigar los impactos producidos por la emisión del biogás a la atmósfera. El diseño del control del biogás debe estar dentro de una filosofía integral, para el diseño y operación del sitio.

#### Diseño del sistema de manejo de biogás

Este sistema se debe diseñar y construir principalmente para coleccionar el gas y utilizarlo como fuente de energía, pero también para controlar la migración del biogás en el sitio de disposición y evitar el olor que se genera, reduciendo las emisiones contaminantes al aire.

El sistema de captación de biogás incluye los siguientes componentes:

- ✓ Pozos de captación
- ✓ Equipamiento de pozos
- ✓ Mecanismos de control de flujos

Para el cálculo del número de pozos se debe considerar las dimensiones del sitio, el radio de influencia y la separación entre pozos. Basándose en las estimaciones de diversas pruebas de producción de biogás se considera un radio de influencia promedio entre 25 a 35 metros, lo que dividido entre el total del área de estudio, determinará el total de pozos por construir.

En el sistema de captación entonces, se debe instalar la cantidad de pozos verticales estimada, en dos secciones interconectadas entre sí, a través de una tubería de 18 pulgadas de diámetro, la cual llevará al biogás hacia la planta de tratamiento y hacia los generadores.

<sup>24</sup> Captación y uso del Biogás en Relleno Sanitario Clausurado, SEDESOL, México, 2005

La primera sección de la tubería debe estar integrada por tubería de 4 pulgadas de diámetro la cual conecta a la mitad de los pozos al sistema. La siguiente sección de tubería consiste de 6 a 14 pulgadas de diámetro, en ambos lados del sistema conforme el flujo de biogás. La tubería de 18 pulgadas lleva el flujo de gas hacia la planta de generación de energía.

A manera de ejemplo y considerando los pozos descritos, en la figura 5.21 se ilustra un ejemplo del sistema de captación activa.

### 5.6.3.2 Sistema de conducción

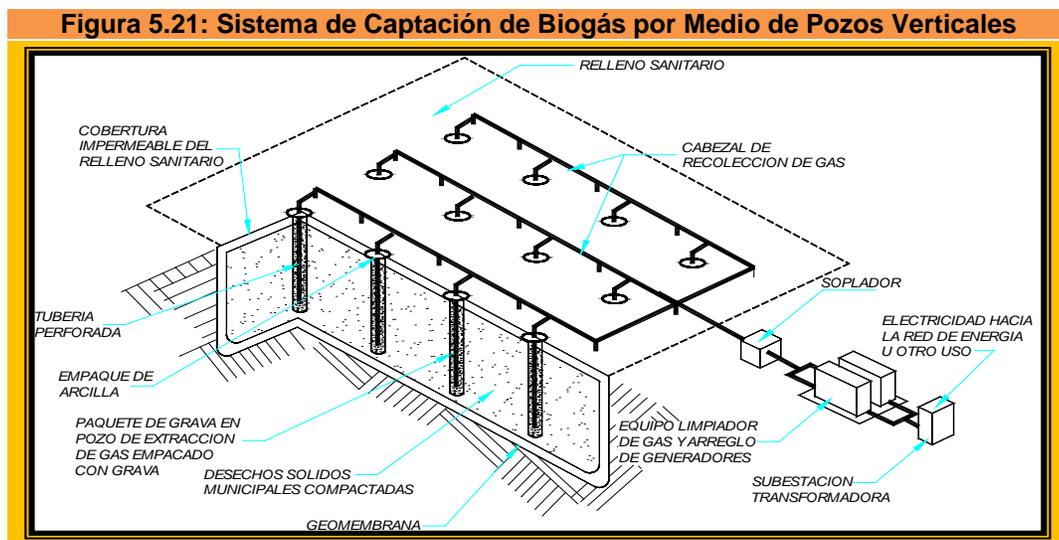
El sistema de conducción consiste en la construcción de una red de tubería de polietileno de alta densidad (PEAD) para transportar el biogás desde los pozos de captación hasta la planta de extracción. El sistema de tuberías de conducción incluye lo siguiente:

- ♻️ Tubería de diámetros de 4, 6, 8, 10, 12, 14 y 18 pulgadas, los cuales conectan los pozos.
- ♻️ Sub cabezales que conectan a grupos de pozos.
- ♻️ Cabezales que transportan el biogás desde los sub cabezales hasta la planta de extracción.

Los arreglos de la red de tubería deberán facilitar el drenado de los líquidos para el manejo de condensados.

Las líneas de cabezales y las líneas laterales constituyen el sistema de conducción de biogás, el cual es transportado posteriormente hasta los sistemas de tratamiento. La tubería transportadora deberá ser superficial y en algunas partes subterráneas.

El arreglo más común considera dos líneas que confluyen en un punto al centro del relleno sanitario.



Fuente: Captación y uso del Biogás en Relleno Sanitario Clausurado, SEDESOL, México, 2005

### 5.6.3.3 Sistema de Succión

A través del sistema de succión se extrae el biogás del relleno sanitario. Este sistema contempla 2 sopladores centrífugos cada uno de ellos debe ser capaz de manejar la mitad del flujo de biogás producido.

El sistema activo de succión debe incluir los siguientes componentes:

- ♻️ Planta de extracción del biogás
- ♻️ Sistema de control eléctrico o mecánico para la operación de la planta

La planta de extracción incluye componentes mecánicos y eléctricos del sistema que capta el biogás que se genera en el relleno sanitario.

Los componentes principales de la planta de extracción se integra con:

- ♻️ Separador de condensados y tanque de almacenamiento con un sistema de bombeo; Tubería y válvulas; Medidores de gas (de calidad y cantidad) y Extractores.

**Figura 5.22: Ejemplo de pozo de captación profundo y combustión conjunta**



Pozo y captación

Conducción

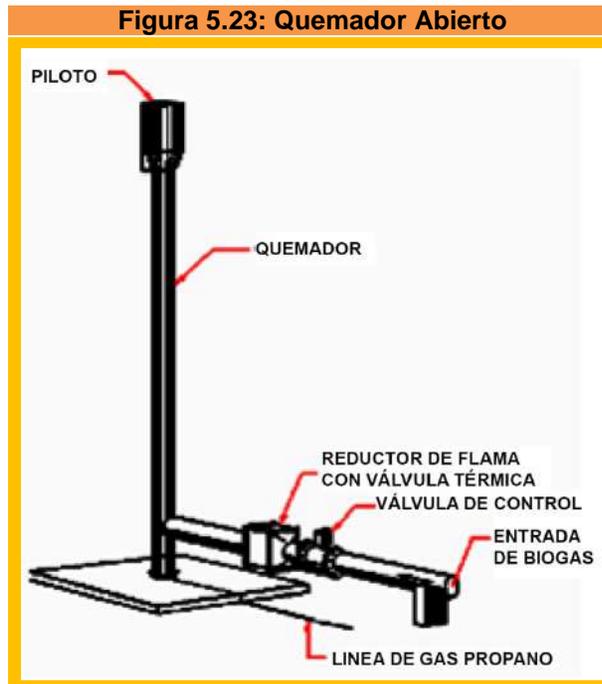
Bomba de aspiración y Antorcha de Combustión

Fuente: Agència de Residus de Catalunya. Cierre técnico del relleno de Serrallarga, Lleida; Cataluña, España

#### 5.6.3.4 Sistema de Quemado

El sistema de quemado tiene el propósito de disponer de los excedentes del biogás que no se utilizan para su aprovechamiento en la planta de generación de energía. En la mayoría de los casos el biogás captado en los rellenos sanitarios que no es utilizado o aprovechado, generalmente es quemado.

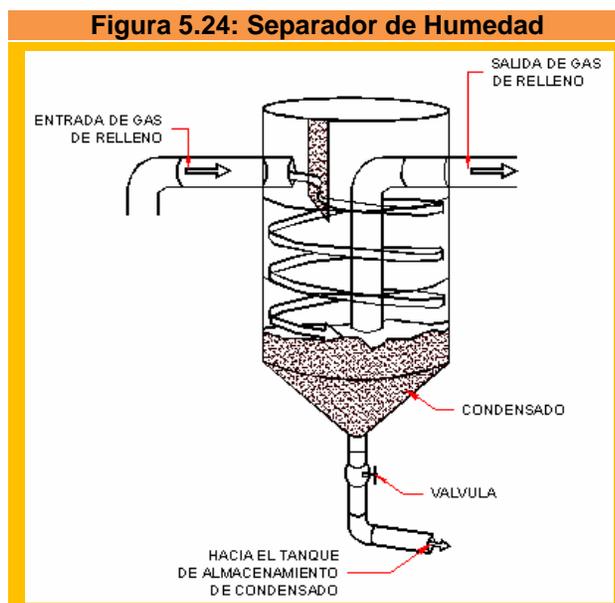
**Figura 5.23: Quemador Abierto**



Fuente: Agencia de Residuos de Cataluña

### 5.6.3.5 Sistema de Limpieza

El biogás contiene metano, bióxido de carbono, trazas de ácido sulfhídrico e hidrocarburos clorados y generalmente se encuentra saturado de vapor de agua. Cuando el biogás es extraído del relleno sanitario se encuentra caliente y también, puede contener pequeñas cantidades de nitrógeno y oxígeno proveniente del aire atmosférico. En los resultados de los análisis del monitoreo, es importante determinar las concentraciones de ácido sulfhídrico presente en la mezcla, puesto que sólo en el caso de que esta sea muy baja, es posible eliminar el sistema de tratamiento o limpieza, dejando únicamente un equipo para eliminar la humedad presente en el biogás.



### 5.6.3.6 Sistema de Suministro

El sistema de suministro está estrechamente relacionado con los requerimientos de los equipos de generación de energía, que son:

- ♻️ Construcción de pozos de captación; Instalación de red de conducción; Instalación de sistema de succión (Sopladores); Instalación de sistema de quemado (Quemadores); Instalación de sistemas de limpieza y suministro; Instalación de un cuarto de máquinas; Instalación de la central de aprovechamiento energético (para el caso de energía eléctrica): Generadores, Transformadores, Interruptores, Barra de interconexión, Tablero de control.

Más información sobre el diseño de los sistemas de captación de biogás puede verse el capítulo 6.

## 5.7 Otros aspectos a diseñar

Respecto de otros temas que requieren de diseño son: el manejo de las aguas de escorrentía, la conformación de la base impermeable del relleno, otros pueden verse en el capítulo 6.

Para el diseño de la red de piezómetros de monitoreo, puede verse el capítulo 8 de monitoreo, apartado 8.1.1 de monitoreo de las aguas superficiales y subterráneas.

# **CAPÍTULO VI: CONSTRUCCIÓN DEL RELLENO SANITARIO**



## CAPITULO VI: CONSTRUCCIÓN DEL RELLENO SANITARIO

### 6.1 Preparación del terreno para la construcción y operación de un relleno sanitario

La preparación del terreno es indispensable para permitir la construcción de la infraestructura básica del relleno, recibir y disponer los residuos sólidos en forma ordenada y con el menor impacto posible, del mismo modo facilitar las obras complementarias del relleno sanitario.

#### 6.1.1 Limpieza del área del relleno sanitario

En el terreno se debe preparar un área que servirá de base o suelo de soporte al relleno, siendo por lo general necesaria la limpieza de malezas y tala de árboles y arbustos, puesto que éstos constituirán un obstáculo para la operación. Esta limpieza debe hacerse por etapas, de acuerdo con el avance de la obra, evitando así la erosión del terreno.

Para fines de desmonte se consideran los siguientes tipos de vegetación:

- a) Selva o bosque, constituida por árboles, arbustos, hierbas, palmeras; típicos de la regiones cálidas y húmedas. Son ejemplos de vegetación selvática, las palmeras, ceibas, mangos, cedros. La vegetación tipo bosque es predominante y está constituida por árboles típicos de las zonas altas de clima templado o frío, como por ejemplo: eucaliptos y podocarpáceas.
- b) Monte de regiones áridas o semiáridas, constituida por especies predominantemente arbustivas y herbáceas, además de los árboles de poca altura y como ejemplo están: zapote costeño, tara, algarrobo, kewiña, etc.
- c) Monte de regiones desérticas, zonas cultivadas o de pastizales, se caracteriza por estar constituida por cactáceas, vegetación de sembradío entre otros.
- d) Manglar, constituida predominantemente por mangles y demás espacios de raíces aéreas típicas de los esteros y pantanos de climas cálidos.

#### 6.1.2 Nivelación

La nivelación es el proceso que permite tener el mismo nivel en toda el área del terreno, una vez que se completan los procesos de desmonte, deshierbe y excavación de tierra. La nivelación también se realiza en la construcción de caminos, sistemas de drenaje y otras instalaciones de apoyo al relleno sanitario.

Los planos de nivelación deben desarrollarse de acuerdo al diseño del drenaje del sitio, las medidas de control de la erosión y las rutas de acceso. Los planos, deben mostrar elevaciones del contorno de todas las zonas modificadas y establecer criterios para las pendientes mínimas y máximas en todas las áreas de corte y de relleno. Es importante que las pendientes e inclinaciones de la base del relleno sanitario se desarrollen sólo después de considerar cuidadosamente las condiciones sub superficiales (por ejemplo, tipo y profundidad del suelo con respecto al nivel freático) y el drenaje del área.

#### 6.1.3 Cortes, Préstamos y conformación de taludes

##### i) Cortes

Son las excavaciones o remoción de los materiales, realizadas en el terreno natural, en la ampliación o abatimiento de taludes, en derrumbes y en rebajes de terraplenes.

Los materiales excavados de acuerdo con la dificultad que presenten para su extracción y carga se clasifican en: Material A, Material B y Material C.

-  **Material A:** Es el blando o suelto con partículas menores de 7.5 cm. de diámetro., que puede ser eficientemente excavado con tractor de orugas de 90 a 110 HP de potencia en la barra.
-  **Material B:** Se caracteriza por la dificultad de extracción y carga, puede ser excavado por un tractor de orugas con cuchilla de inclinación variable de 140 a 160 HP en la barra o por una pala mecánica. Se consideran también como material “B” a las piedras sueltas menores de 1/2 m<sup>3</sup> y mayores de 20 cm de lado.
-  **Material C:** Sólo puede ser excavado mediante el empleo de explosivos de detonación rápida; también se consideran como material “C” las piedras sueltas que aisladamente cubiquen más de 1 m<sup>3</sup>. Entre los materiales clasificables como material “C” están las rocas basálticas, las areniscas y los conglomerados y fuertemente cementados, calizas, riolitas, granitos y andesitas sanas.

Para clasificar un material se debe tomar en cuenta la dificultad que haya presentado en su extracción y carga, ajustándolo al que corresponda de los materiales “A”, “B” y “C”, de manera de determinar de cual se trata en la siguiente forma: 20 - 30 - 50 que quiere decir 20% de material “A”, 30% de material “B” y 50% de material “C”. Es decir que cada material se debe clasificar por separado y en proporción a su volumen, se clasificará el total.

## ii) Préstamos

Son excavaciones que se ejecutan en los lugares fijados en el proyecto a fin de obtener el material de cubierta. Para iniciar el trabajo de préstamo, previamente se despalmará la superficie por excavar, desalojando la capa superficial de terreno natural que por sus características no sea adecuada para ser utilizada como material de cobertura. Los despalmes sólo se ejecutan en material “A”. El despalme se inicia después de que se haya efectuado el seccionamiento de la superficie y el material producto del despalme se colocará en el lugar que se indique. Se debe procurar que durante la excavación no se alteren ni modifiquen las referencias y bancos del nivel del seccionamiento.

La ubicación y las dimensiones de los préstamos serán fijadas en cada caso en el proyecto. Los préstamos se deben excavar hasta la profundidad fijada en el proyecto; siempre la excavación será en material apropiado y en la forma más regular posible a fin de facilitar su medición.

## iii) Taludes

Debido a las grandes variaciones en el tipo y disposición de los materiales, es indispensable analizar la estabilidad del terreno para definir el talud más apropiado. Se puede establecer como norma que para un corte de más de 7 m de altura, se debe realizar el estudio de estabilidad con base en principios de la geotecnia. Para alturas menores, casi siempre se puede definir el talud con base en la clasificación de las rocas y suelos y en el estado de disposición de los materiales de corte.

Para un corte de baja altura (menor a 5 m), se puede recomendar un único talud; para alturas mayores, es mejor tener dos taludes diferentes, mientras que en otros casos es necesaria la construcción de bermas o banquetas intermedias.

Los taludes del terreno se dejan de tal manera que no causen erosión y puedan darle una buena estabilidad al relleno. Estos pueden ser desde verticales hasta del tipo 3:1 (horizontal: vertical), dependiendo del tipo de suelo.

La superficie de las terrazas o terraplenes deberá tener una pendiente del 2% con respecto a los taludes interiores, a fin de conducir las aguas de lixiviado a las zanjas de drenaje y evitar encharcamientos cuando se usen como vías temporales de acceso; lo anterior contribuye también a brindar estabilidad a la obra.

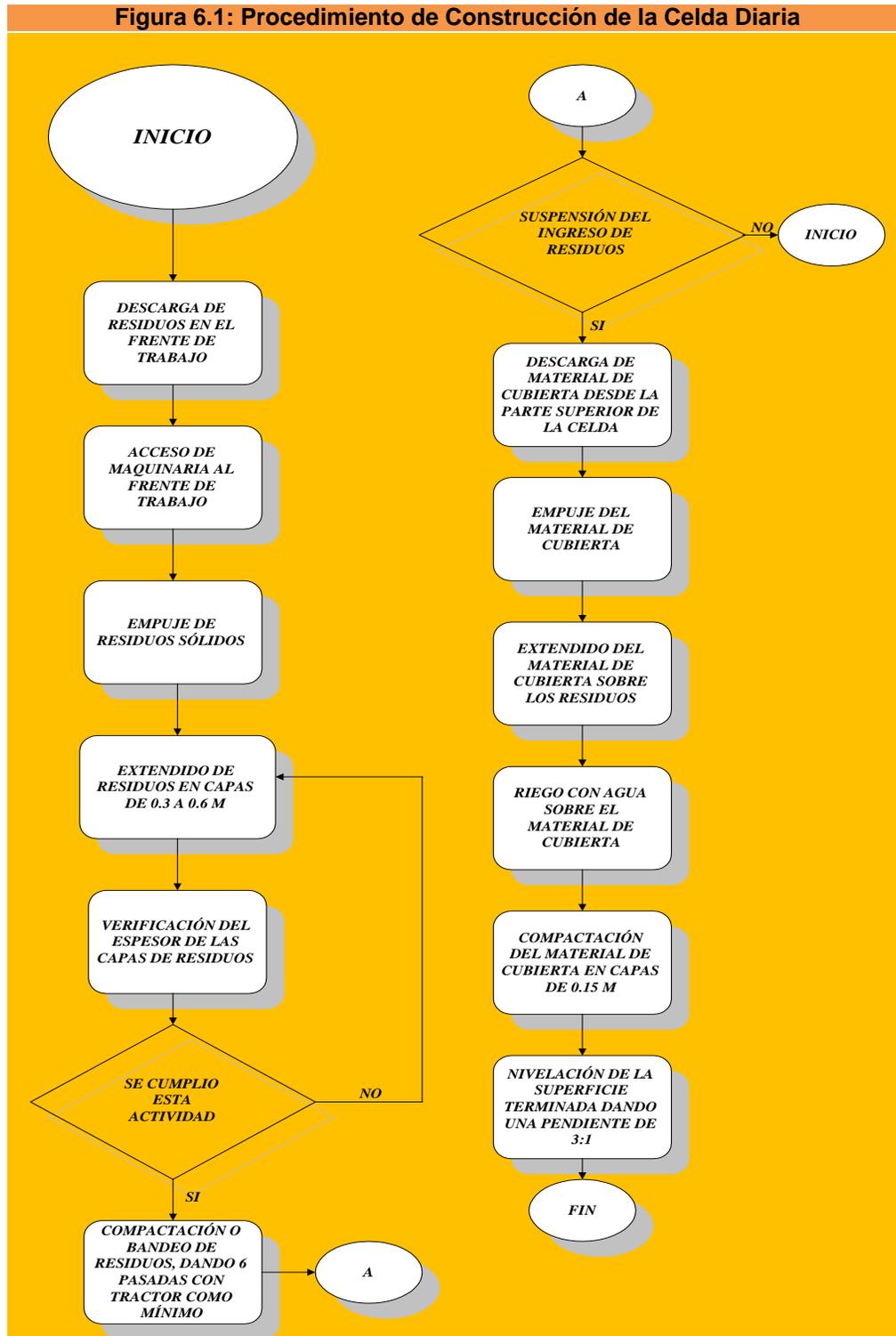
Las zanjas podrán tener forma trapezoidal, cuadrada o rectangular, dependiendo de las condiciones del suelo. La separación entre ellas será de 0.5 a 1 m., según se requiera para garantizar su estabilidad mientras permanecen vacías.

## 6.2 Criterios generales para la construcción de celdas

Los criterios constructivos para la celda diaria se listan a continuación:

- ♻ Las celdas se construyen inicialmente en un extremo del sitio y se avanza hasta terminar en el otro extremo, cuando existan ondulaciones y depresiones en el terreno, deberán ser utilizadas como respaldo conforme a las primeras celdas de una determinada capa constructiva.
- ♻ Se prepara el terreno para trabajarlo a base de terrazas y al mismo tiempo se extrae material para la cubierta.
- ♻ El frente de trabajo o ancho de la celda se calcula de acuerdo a lo establecido en los puntos anteriores.
- ♻ Los cortes al terreno se hacen siguiendo la topografía del sitio para formar terrazas y aprovechar al máximo el terreno.
- ♻ El talud de la celda tendrá una relación de 3:1 con ángulo de 18°.
- ♻ Cada celda del relleno será contigua con la del día anterior y así sucesivamente, hasta formar una hilera de celdas que se denominarán franjas. Estas celdas se construirán de acuerdo con la topografía del sitio.
- ♻ Las franjas al irse juntando forman capas, estas se construirán considerando la altura del sitio disponible para el relleno.
- ♻ Las cubiertas intermedias que sirven de separación de las celdas diarias serán de 0,20 m. de espesor y la cubierta final será de 0,60 m.
- ♻ Las cubiertas tendrán una pendiente del 2% para el drenado adecuado que impidan el paso del agua, para evitar la erosión se cubrirán con especies propias de la región.

**Figura 6.1: Procedimiento de Construcción de la Celda Diaria**



Fuente: Operación de Relleno Sanitario, SEDESOL, 2005

### 6.3 Construcción de la Capa Base Impermeable del Relleno Sanitario

Dependiendo de los estudios preliminares (estratigráfico del suelo y el nivel de acuíferos freáticos permanentes y transitorios) se realizara las siguientes preparaciones de capa base del relleno sanitario manual o mecanizado.

### 6.3.1 Barrera Geológica en Rellenos Sanitarios Manuales

La barrera natural o geológica es una capa de suelo de baja permeabilidad que se encuentra arriba de la primera capa freática. Lo ideal para la construcción de un relleno sanitario es que el terreno disponga de una barrera natural o geológica conformada por arcilla, limo y morrenas.

Si el suelo natural tiene una permeabilidad menor a  $k = 10^{-7}$  y un espesor de 3 m o más, constituye una buena barrera geológica para un relleno sanitario manual.

El objetivo de preferir un terreno con barrera geológica es:

- ✓ Minimizar la cantidad de lixiviados que se infiltran al suelo, al fin de proteger las capas freáticas.
- ✓ Ralentizar la difusión de contaminantes en el suelo
- ✓ Garantizar que la mayoría de los contaminantes se queden en la proximidad del relleno, incluso si se daña la capa mineral y la capa plástica.

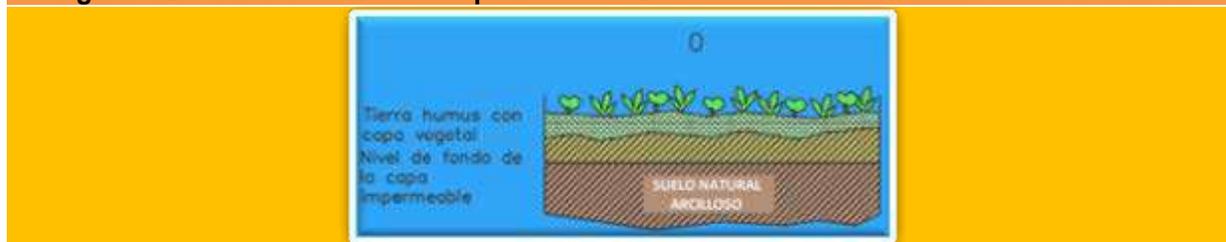
### 6.3.2 Capa Base de Arcilla

Para una mejor protección de las aguas subterráneas, es muy importante que se construya una capa de arcilla impermeable en la base del relleno sanitario, a fin de impedir la filtración de los lixiviados hacia las capas freáticas. Generalmente, se considera como impermeable un suelo con un factor igual o menor a  $10^{-7}$  m/s.

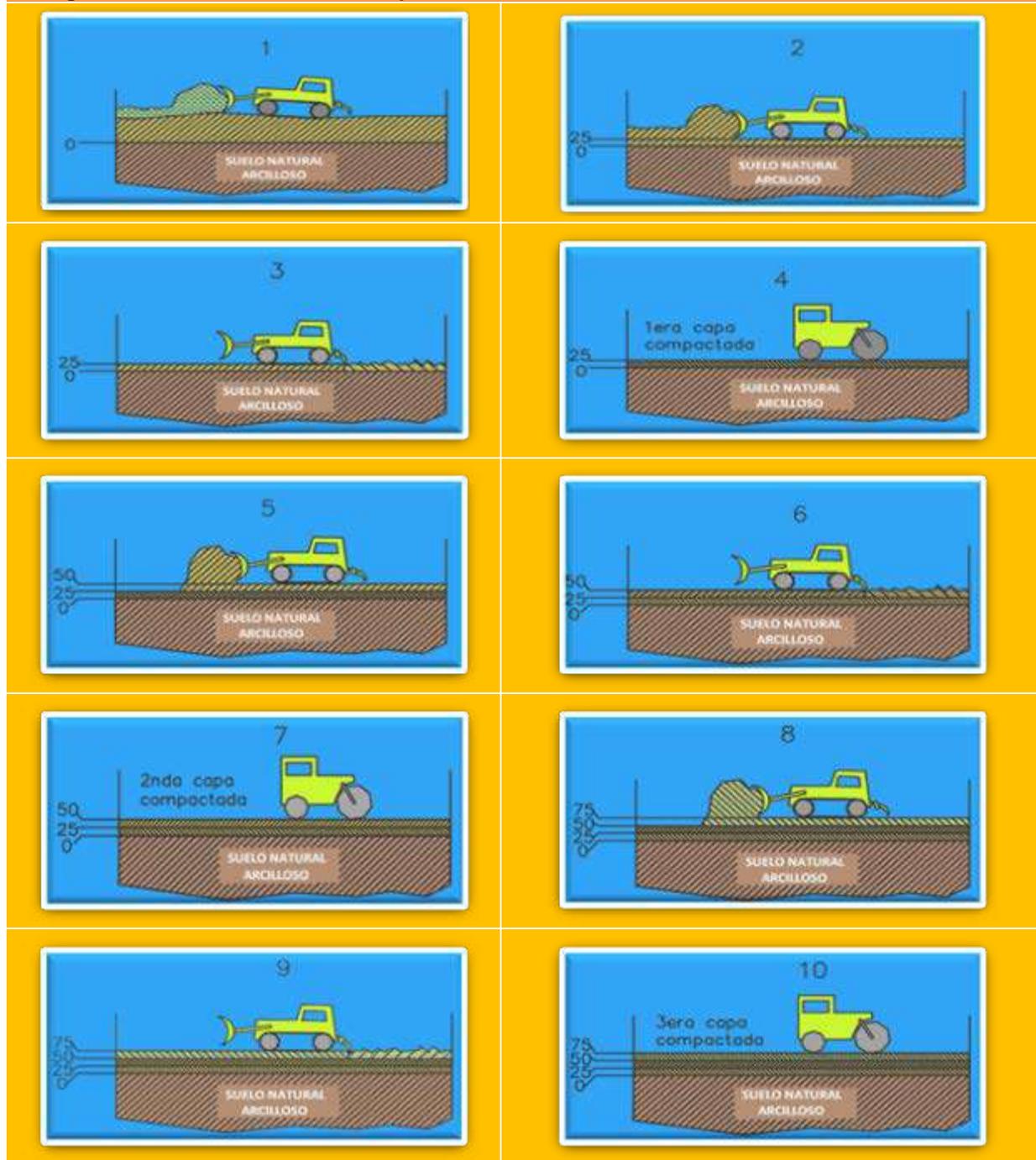
Cuadro 6.1: Parámetros Importantes para la Capa Mineral de Base	
Criterio	Valor Recomendado
Espesor de capa base	0,75 (m)
Factor de Permeabilidad	$10^{-7}$ (cm/s)
Contenido de partículas pequeñas (< 0,002 mm) (%)	>20 %
Contenido de arcilla	> 10 (%)
Tamaño mínimo de partículas	20 (mm)
Contenido de agua	< 5 (%)
Contenido de materia orgánica	< 5 (%)

El suelo que tiene las características más próximas a los criterios descritos sería el más apropiado tanto para la capa base como para material de cobertura intermedia y final del relleno sanitario. Los trabajos y valores recomendados para la construcción de la capa base del relleno sanitario cuando existe una barrera natural o geológica se explican en la siguiente figura:

Figura 6.2: Construcción de la Capa Base con Barrera Natural en Relleno Sanitario Manual



**Figura 6.2: Construcción de la Capa Base con Barrera Natural en Relleno Sanitario Manual**



1.- Excavación de la tierra superficial, 2.-Preparación del terraplén, lo que va a servir como fondo del relleno. El terraplén se hace 25 cm arriba del nivel diseñado como fondo del relleno. Si es necesario, se compacta con rodillo, 3.- Se escarifica y homogeniza el primer estrato (hacia una profundidad de 25 cm), después se moja y seca, 4.- Compactación del Primer Estrato, 5.- Se carga el segundo estrato con un espesor de 25 cm. Para eso, se puede utilizar el material excavado durante la preparación del terraplén, 6.- Se escarifica y homogeniza el segundo estrato (hacia una profundidad de 25 cm), después se moja y seca, 7.- Compactación del segundo estrato, 8.- Se carga el tercer estrato con un espesor de 25 cm. Para eso, se puede utilizar el material excavado durante la preparación del terraplén, 9.- Se escarifica y homogeniza el tercer estrato (hacia una profundidad de 25 cm), después se moja y seca, 10.- Compactación del tercer estrato.

**Fuente:** Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales, Robén Eva, Loja, Ecuador, 2002

Si un municipio realiza un relleno sanitario manual y no dispone de la maquinaria necesaria para hacer la preparación de la capa base, es aconsejable realizar mínimamente una buena compactación del suelo natural y colocar una capa base escarificada y compactada.

Para la impermeabilización con el suelo natural se debe colocar una capa de arcilla de unos 0,75 cm de espesor (tres pasadas de 25 cm como se observa en la figura 6.2), la cual llevará una proporción de 40% de arcilla, con 25% de arena (0.1-1.0 mm) y 35% de grava (10-50 mm). La mezcla del material se debe realizar mediante la utilización de motoconformadora, hasta lograr la homogeneización de la mezcla; el material ya mezclado debe ser regado hasta que alcance un 13,35% de humedad el cual corresponde al 4% superior al óptimo de compactación y debe dejar reposar durante tres días para lograr una mayor homogeneización en el contenido de agua. El material debe ser extendido a en forma regular sobre todo el piso de la celda, conformando una primera capa de 25 cm de espesor mediante el uso de motoconformadora, para luego compactarlo al 90 % utilizando rodillo compactador sin vibración. Lo que se desea es lograr un amasado del material con objeto de darle una textura y acomodo a las partículas de la mezcla para maximizar su eficiencia impermeable. Aplicando este sistema de compactación del material se espera obtener permeabilidades del orden de  $1 \times 10^{-7}$  cm/s.

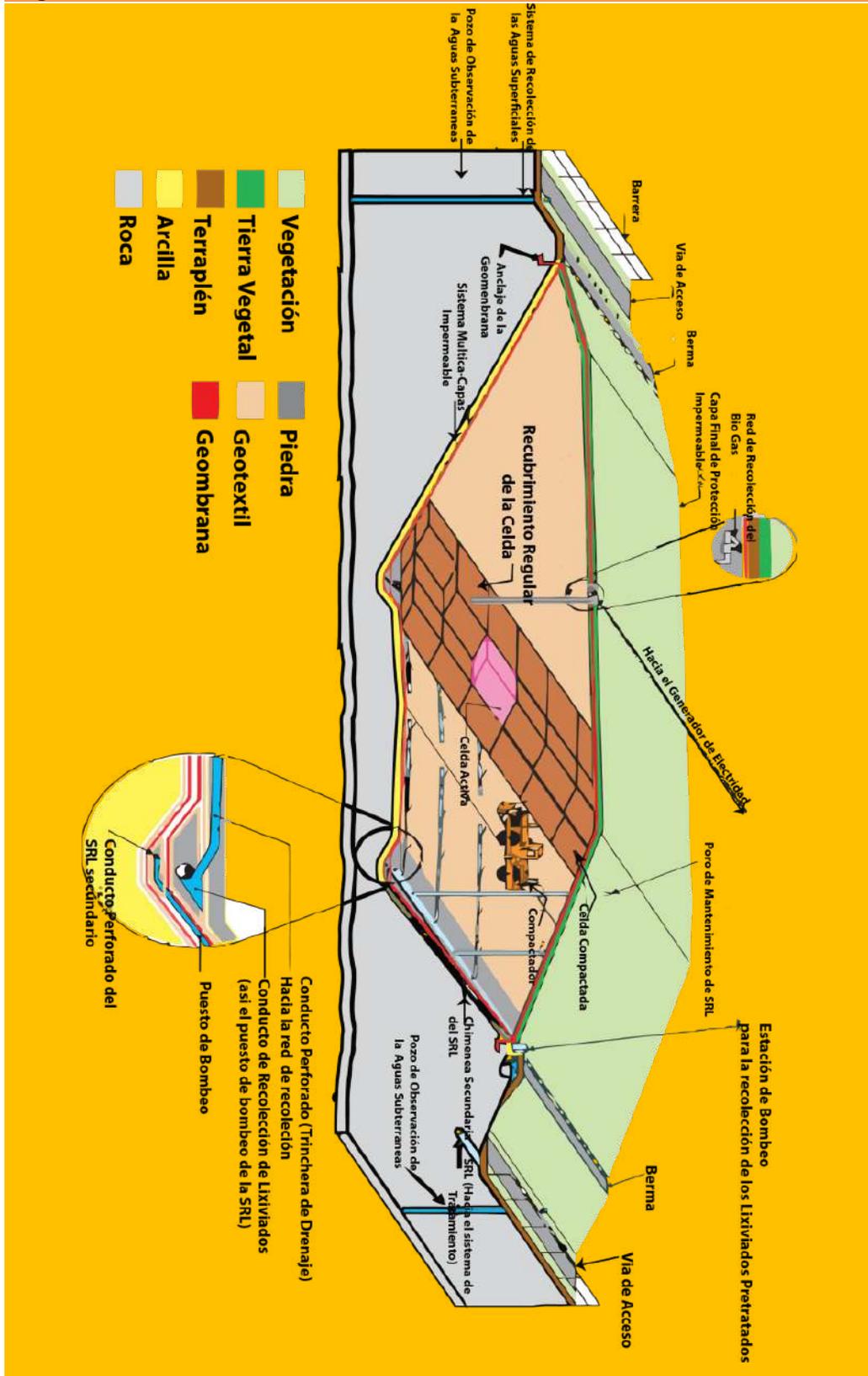
Una vez que se encuentre conformada la primera capa y se encuentre adecuadamente compactada, se procederá a repetir el procedimiento para formar una segunda capa de igual espesor, y una tercera, logrando con ello un espesor de unos 0,75 m.

## 6.4 Uso de Geosintéticos

Los geosintéticos son ampliamente utilizados en el diseño de sistemas de impermeabilización tanto de la base como la cobertura en instalaciones de rellenos sanitarios. Para mayor protección, se recomienda utilizar los siguientes geosintéticos:

- ♻ Geomembranas (Aislamiento), son láminas poliméricas relativamente impermeables que pueden ser usadas como barreras de líquidos, gases y/o vapores.
- ♻ Geotextiles (Refuerzo, separación, filtración, drenaje). Pueden ser usados con fines de filtración o como un colchón para proteger geomembranas contra el punzonado.
- ♻ Geomallas (Para drenaje). Puede ser usados para reforzar taludes por debajo de los residuos así como para reforzar los suelos de cobertura por encima de las geomembranas.
- ♻ Georedes (Estabilidad de taludes). Pueden ser usadas en drenaje en planar.

**Figura 6.3: Sistemas de Revestimiento de Geosintéticos en un Relleno Sanitario**



Fuente: [www.comaga.org.ec/](http://www.comaga.org.ec/) Importancia de las Geomembranas en los Rellenos Sanitarios -

### 6.4.1 Capa Base de Geomembrana

En municipios con poblaciones mayores a cien mil habitantes y en sitios donde no se presenta barrera natural o geológica y se tiene un alto grado de permeabilidad de los suelos y por consiguiente alta probabilidad de contaminar las aguas subterráneas es necesario aplicar Geomembrana de Polietileno de Alta Densidad con espesor de 1-1,5 mm que garantice evitar roturas, cumpliendo las siguientes características:

- ✓ No debe contener huecos, roturas, burbujas o cavidades
- ✓ No debe tener torsiones diagonales
- ✓ Su espesor debe ser homogéneo
- ✓ Deben ser impermeables para agua, hidrocarburos clorados y no clorados, acetona.
- ✓ Deben ser resistentes contra calor y condiciones climáticas adversas.
- ✓ Deben ser resistentes contra desgaste mecánico (roturas, pinchazos etc.)

La impermeabilización debe diseñarse a base de diferentes capas (doble impermeabilizante, el inferior con arcilla y geomembrana y el superior con arcilla), lo que habrá de combinar características de membrana impermeable con sistemas drenantes. La conjunción de estas propiedades permite manejar los lixiviados de manera segura impidiendo que éstos se percolen hacia el subsuelo.

La estructura del sistema de impermeabilización se encuentra compuesta por una serie de capas de composición y grosor que dependen de las características del suelo, del presupuesto para el proyecto, del nivel de la napa freática, entre otros.

#### 6.4.1.1 Pasos para Instalar Geomembranas

##### 1) Preparación de la superficie

La superficie a ser impermeabilizada debe tener una textura suave y libre de presencia de rocas o piedras, puntas, raíces o cualquier otro elemento punzante que pudiera llegar a perforar o rasgar la Geomembrana. Por otro lado, no debe colocarse en presencia de humedad, de lodo o de agua. Si la Geomembrana se instala en sitios donde existe nivel freático, se pueden presentar gases que pueden elevar la Geomembrana.

##### 2) Control de la vegetación

En casos de presencia de vegetación, se recomienda la aplicación de herbicidas, los cuales serán aplicados por lo menos 48 horas antes de la iniciación de la instalación.

##### 3) Zanja de Anclaje

La zanja de anclaje debe estar de acuerdo con las dimensiones previstas en el diseño. Si la zanja de anclaje se ubica en una superficie inestable, se debe excavar por día, la longitud de zanja necesaria para anclar el material de ese día.

Los sitios donde la geomembrana ingrese a la zanja deben estar libres de irregularidades y protuberancias. El relleno como material de tierra, se debe efectuar en el momento en que la geomembrana esté en su estado de mayor contracción para evitar posibles daños por inestabilidad dimensional.

Es importante tener en cuenta que la profundidad de la zanja de anclaje es dependiente de factores tales como: relación del talud e inclinación y longitud del talud. No es aconsejable taludes superiores a 20,0 m en estos casos se deben hacer dos zanjas; es decir una zanja de anclaje cada 20,0 m

#### 4) Colocación de la geomembrana

##### Descargue del material

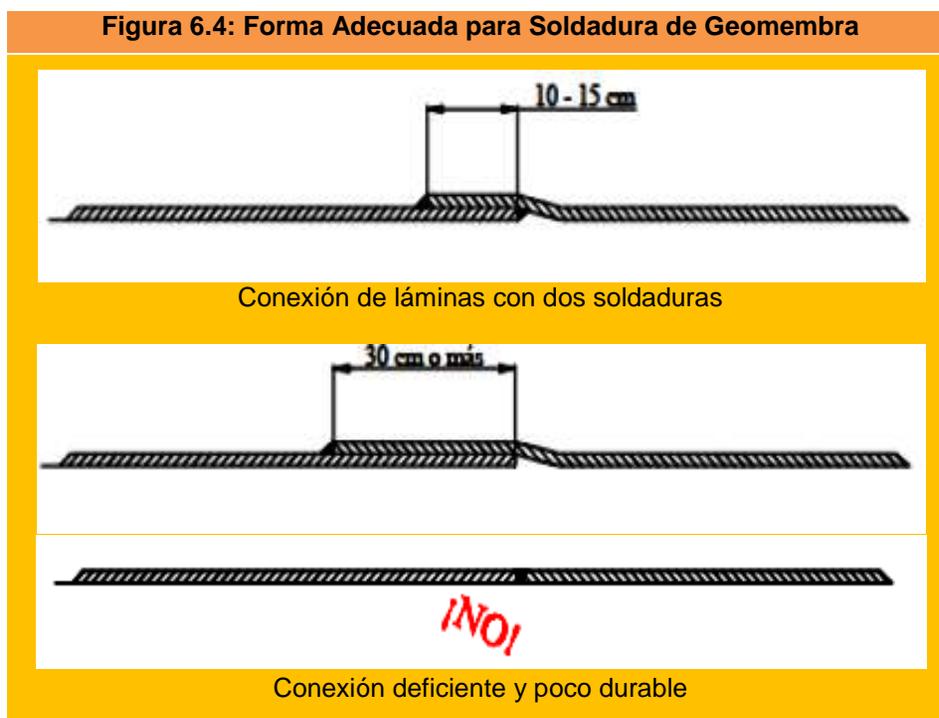
Para el descargue del material, se deberá contar con equipo de cargue, como montacargas, grúa, retroexcavadora, cargador u otro equipo habilitado para tal fin.

Durante la colocación de la geomembrana se debe partir de la parte alta de la celda, dejando correr el rollo hasta lograr el alargamiento deseado; para que esto sea posible, se puede anclar en la parte alta mediante el recubrimiento con arena compactada al 80%, dentro de una cepa previamente escarbada, en donde se introduce la geomembrana. Los empalmes entre rollos se realizan mediante termofusión doble. Una vez que se tenga toda la geomembrana perfectamente extendida se deberá verificar a través de inyección de aire o espumantes, la perfecta unión de los rollos de geomembrana.

##### Extensión de la geomembrana

Consideraciones a seguir:

- ♻ Extender los rollos que se puedan sellar en una jornada de trabajo únicamente.
- ♻ Disponer de una superficie preparada de tal manera que se asegure el mínimo de manejo.
- ♻ Evitar el daño durante el manipuleo, descarga o extensión del mismo.
- ♻ Como medida de seguridad, se debe contar con un sistema de lastre (sacos con tierra, arena o llantas) para evitar que la Geomembrana se desacomode durante el proceso de extensión.
- ♻ El contacto directo con la Geomembrana por cualquier tipo de equipo debe ser minimizado. Si se requiere, las áreas deben estar protegidas con una capa de arena mayor a 40 cm. de espesor.



**Fuente:** Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales, Robën Eva, Loja, Ecuador, 2002

## 5) Taludes

Para la instalación de geomembranas en los taludes, como precaución, estos no deben ser mayores 20,0 m y deben tener la suficiente holgura y anclarse en una zanja provisional, de manera que los procesos de variaciones dimensionales por efecto de temperatura y acomodamiento del geosintético por efectos del material de lleno sobre este, permitan que la geomembrana en ningún punto quede bajo tensión actuando únicamente como barrera impermeable sin asumir esfuerzos de ningún tipo.

Así mismo, debe tenerse en cuenta que entre más perpendicular sea el talud mayor profundidad debe tener la zanja de anclaje; un talud bien conformado como máximo debe tener una relación 1:1, es preferible una relación de 1:2 siendo que se puede disminuir el fondo.

## 6) Cortes

Toda obra presenta una cantidad relativa de cortes. Se considera corte cuando el material está por debajo de 21 m<sup>2</sup>, es decir de 7 m de ancho x 3 m de largo. Estos materiales pueden ser sellados térmicamente, con los cuales podría construirse un módulo lo suficientemente importante para hacer un recubrimiento.

Este tipo de material, es aconsejable instalarlo en bermas o taludes no pronunciados y que no superen los 12 a 15 metros de profundidad.

## 7) Condiciones climáticas

La extensión de la Geomembrana debe estar de acuerdo con las condiciones climáticas, dirección del viento, calidad de la superficie, acceso al sitio y cronograma de instalación. En lo posible los traslapes entre los rollos de Geomembrana deben realizarse en el sentido de la dirección del viento para minimizar los efectos del viento en los bordes.

## 8) Sellado

El sellado consiste en unir dos rollos usando métodos térmicos. Como norma general las uniones o sellados deben orientarse en dirección de la pendiente del talud, y no en dirección perpendicular a la pendiente del talud. Existe dos métodos de procesos térmicos, aprobados para efectuar los sellados y reparaciones que son: sellado por extrusión y por fusión.

**Sellado por fusión:** Este proceso debe ser usado para unir paneles o rollos y no para realizar parches o trabajos detallados. El equipo a emplear es una selladora de cuña caliente equipada con rodillos de canal que permiten realizar posteriormente la prueba de presión de aire.

**Sellado por extrusión:** Este proceso se utiliza principalmente para efectuar reparaciones, parcheo y detalles constructivos especiales. Se emplea para unir Geomembrana nueva con otra previamente instalada, y en lugares donde la franja no es suficiente para realizar sellado por fusión.

## 9) Preparación de las uniones

Se debe verificar antes de sellar, que el área de unión esté libre de suciedad, polvo, grasa o cualquier otro elemento que impida una correcta unión entre los materiales.

La Geomembrana se debe traslapar adecuadamente (aprox. 15 cm), en todo el trayecto al momento que se vaya a iniciar la unión. Adicionalmente, durante el proceso de limpieza se debe revisar el material para detectar áreas defectuosas para ser reparadas previo a la iniciación del sellado.

## 10) Acoples a tuberías

En el paso de tubería a través de la Geomembrana, ésta se corta circularmente para que no haya propagación de rasgado, y se construye una bota para la tubería, de acuerdo con el diámetro de la misma. Se recomiendan cortes en la Geomembrana del mismo tamaño del tubo o menor, para optimizar el acople.

## 11) Relleno a la zona de anclaje

La zanja de anclaje debe ser llenada y compactada adecuadamente con tierra del lugar. El relleno de la zanja se debe realizar de forma tal que evite efectuarse cualquier daño a la Geomembrana.

### 6.4.1.2 Espesor de geomembranas

Existen geomembranas de diferentes espesores y tensiones que pueden ser empleados en función al tipo de residuos, la cantidad y la ubicación del sitio. En geomembranas de polietileno de alta densidad (PEAD), varía de 0,8 a 2,0 mm de espesor con un ancho de rollo de 1,0 a 7,0 m. Se recomienda emplear como mínimo de 1,5 mm de espesor.

En el siguiente cuadro, se relacionan algunas propiedades mecánicas de la geomembrana, resistencia a la tensión, susceptibilidad al rasgado, punzonamiento y daño por impacto. El espesor es una propiedad física relacionada con el comportamiento mecánico, donde el incremento presentado puede ser en algunos casos lineal o exponencial. Por esta razón, se requieren un espesor mínimo bajo cualquier circunstancia. Sin embargo, más allá de un simple valor para todas las condiciones, el espesor mínimo y sus propiedades subsecuentes deben estar relacionados con las condiciones específicas del sitio.

Espesor (mils)	Espesor (mm)	Tensión (lb/plg)	Pelado/Corte (lb/plg)
30	0,8	66	48
40	1,0	80	52
60	1,5	120	78
80	2,0	160	104

**Nota:** 1 mils = 0,0254 mm; 1plg = 2,54 cm

### 6.4.1.3 Geotextil

Por debajo y por encima de la geomembrana, se recomienda un geotextil no tejido de 200 gr/m<sup>2</sup>, que tiene la finalidad de proteger la geomembrana.

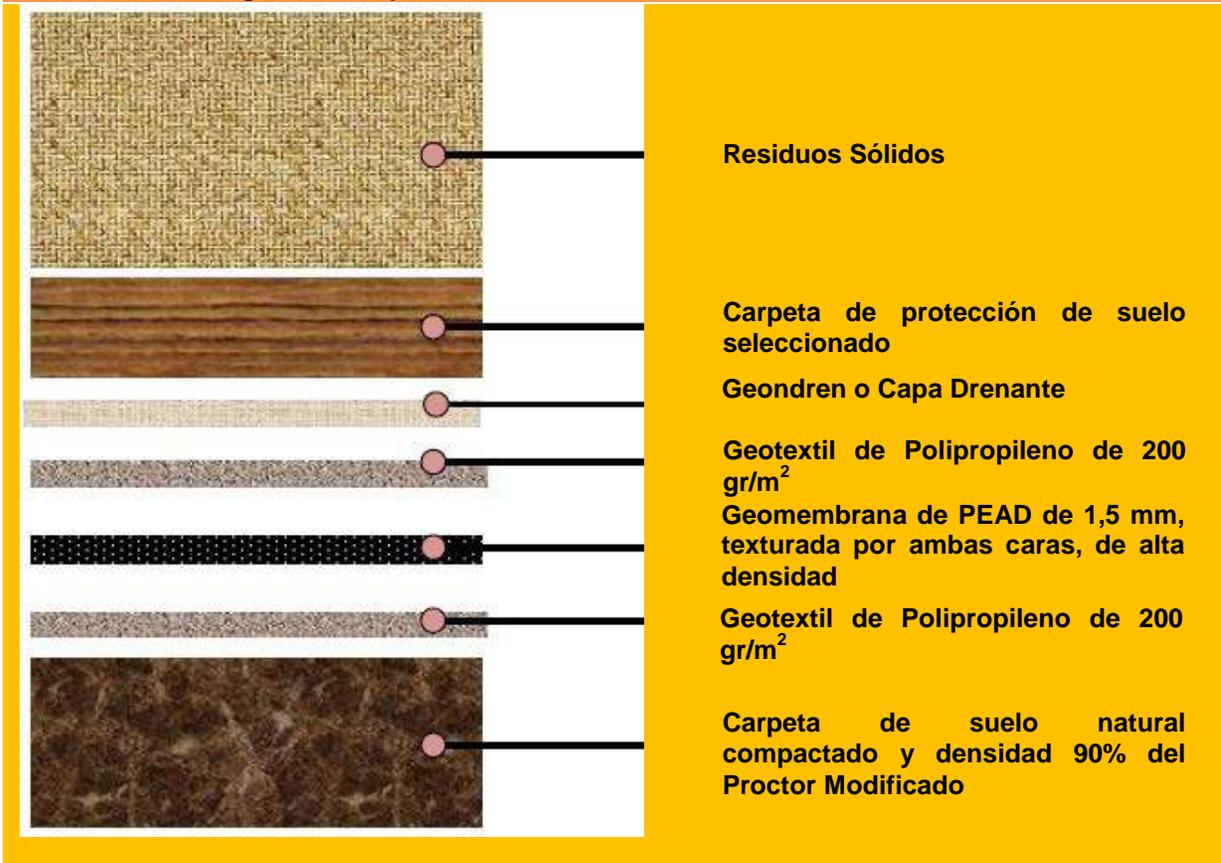
## 6.4.2 Drenaje Secundario

Sobre la membrana sintética y sobre el geotextil no tejido de protección, se debe colocar una capa drenante constituida por gravas, con una granulometría comprendida entre 30 y 50 cm, y se debe extender en forma regular en todo el piso de la celda de confinamiento. Este material puede ser obtenido en el sitio mediante el cribado del material producto de excavación de la celda de acuerdo con la granulometría antes indicada; la capa drenante tiene como finalidad colectar y conducir los lixiviados y agua pluvial que se llegue a captar en la celda y que hubiesen logrado flanquear la membrana primaria. Es muy importante que los agregados pétreos que constituyen la capa drenante se extiendan sobre la membrana sintética con extremo cuidado, utilizando equipo sobre ruedas de preferencia ligero como una motoconformadora para no dañar la membrana y geotextil.

Los camiones de volteo para el acarreo del material para la capa drenante, deben ir vaciando de tal manera que se formen montículos muy próximos unos de otros para luego abandonar el sitio circulando lentamente sobre la membrana para evitar daños a esta; así mismo es importante que los camiones no frenen bruscamente ya que ello podría causar rasgaduras en la membrana. Conforme se

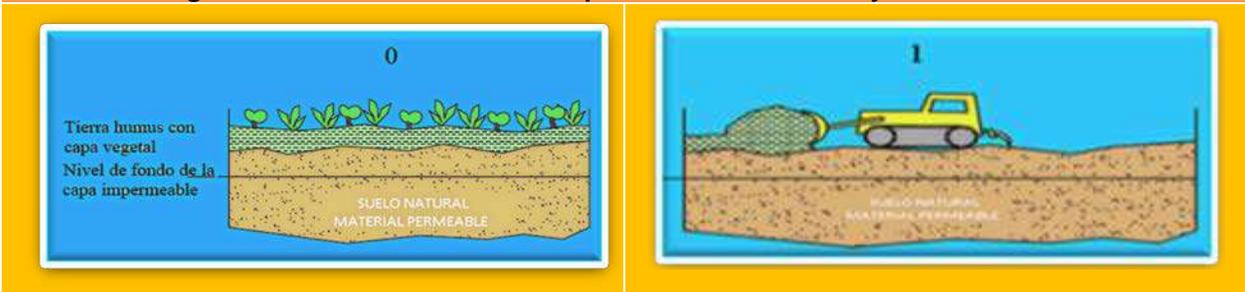
van vaciando los camiones de volteo la motoconformadora deberá ir extendiendo y conformando la capa de 20 cm de espesor. El material de la capa drenante se debe regar y mezclar antes de su colocación. Luego, el material de la capa drenante debe ser compactada mediante rodillo vibratorio al 90% de su peso volumétrico seco máximo.

**Figura 6.5: Impermeabilización de la base del Relleno Sanitario**

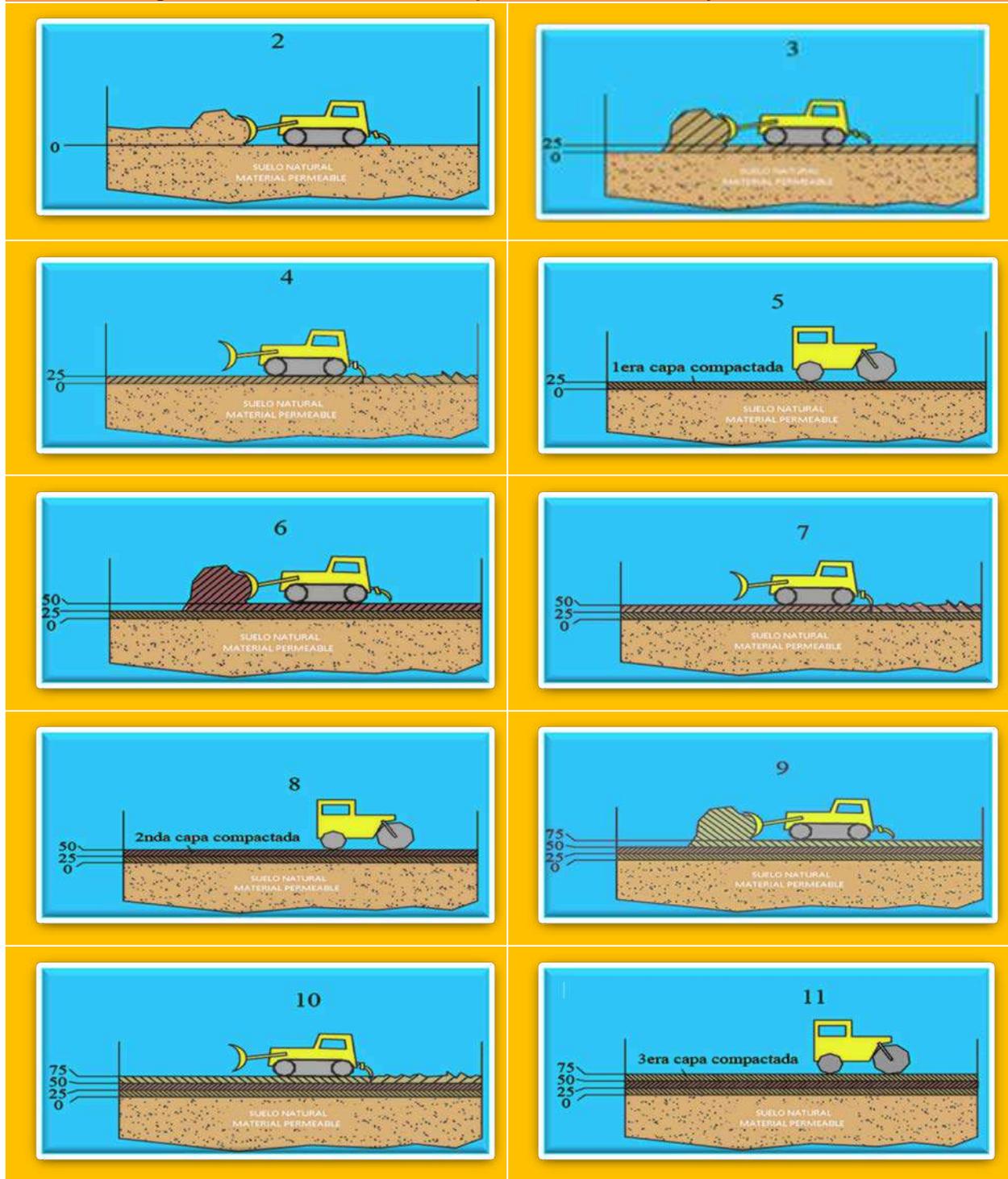


Fuente: Agencia de Residuos de Catalunya

**Figura 6.6: Construcción de la Capa Base Cuando no hay Barrera Natural**



**Figura 6.6: Construcción de la Capa Base Cuando no hay Barrera Natural**



1. Retiro de cobertura vegetal; 2. Nivelación de Base; 3. Esparcir material impermeable; 4. Escarificación de material; 5.- Compactación primera capa; 6.- Esparcir material impermeable; 7. Escarificación de material; 8.- Compactación segunda capa; 9.- Esparcir material impermeable; 10. Escarificación de material; 11.- Compactación tercera capa.

**Fuente:** Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales, Robén Eva, Loja, Ecuador, 2002

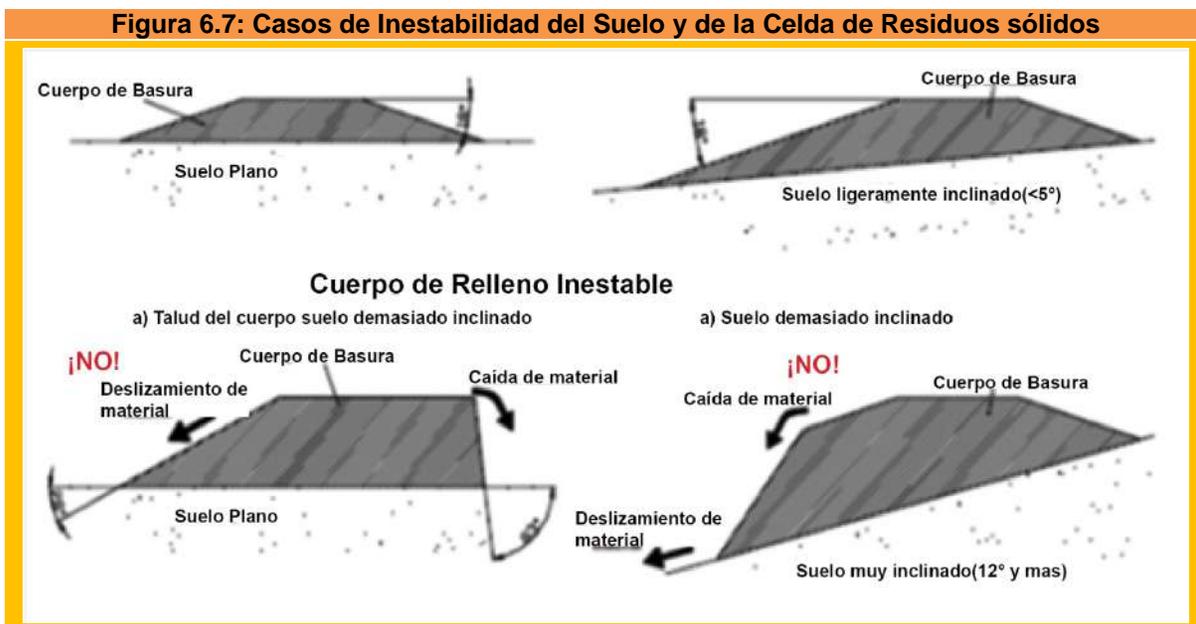
## 6.5 Seguridad y Estabilidad del Relleno Sanitario compactado con Maquinaria<sup>25</sup>

Los rellenos sanitarios que cuentan con maquinaria compactadora se construyen generalmente en forma de colina artificial. Desde el punto de vista de la estabilidad del suelo, el relleno sanitario construido al lado de un talud se puede también considerar como colina artificial. El plano horizontal se diseña según la topografía específica del sitio. Lo más importante es que el diseño asegure la estabilidad tanto del fondo como de los taludes del relleno. Se debe considerar, si en el relleno sanitario se disponen todo tipo de residuo o si se valoran los residuos biodegradables y reciclables; en el caso de disponer también residuos biodegradables, la humedad y la pérdida de materia a causa de su descomposición baja la estabilidad de la celda y por ende de la macrocelda y del relleno sanitario.

Se deben tomar en consideración dos tipos de inclinación: 1) la inclinación del terreno, si se hace el relleno en un área inclinada (como en una quebrada seca), y la inclinación de la celda de residuos sólidos. Existen dos criterios importantes para optimizar la inclinación del talud. Si el talud es muy inclinado, el volumen disponible crece proporcionalmente, pero baja la estabilidad de la celda (cuerpo) de residuos sólidos y, en consecuencia, hay más peligro de caídas del material.

Si se construye un relleno sanitario sobre un terreno inclinado, son válidos los mismos principios para la estabilidad de ese terreno. No se debe utilizar un terreno demasiado inclinado para no arriesgar la seguridad estática de la celda de residuos sólidos que podría caerse completamente o parcialmente. La presencia de fuentes de agua, bajo la celda de residuos sólidos o un drenaje insuficiente aumentaría ese riesgo. Además, es casi imposible hacer una compactación apropiada sobre un terreno sumamente inclinado.

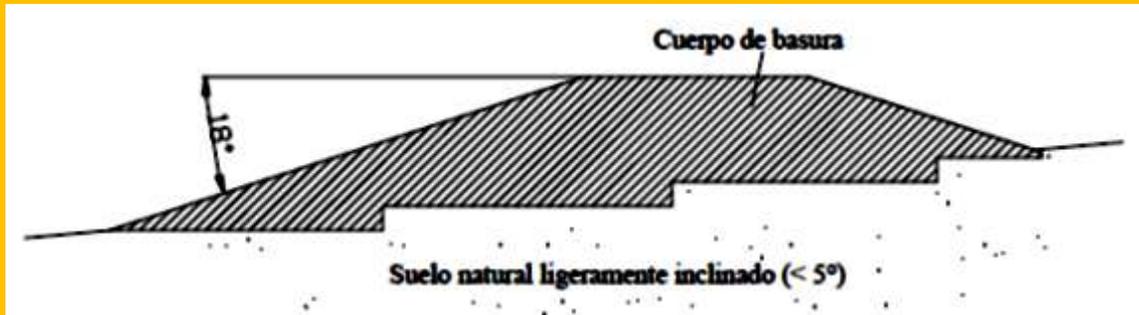
Los peligros de la construcción de una celda de residuos sólidos con talud demasiado inclinado y de la construcción del relleno sanitario sobre un terreno muy inclinado son mostrados en la siguiente figura:



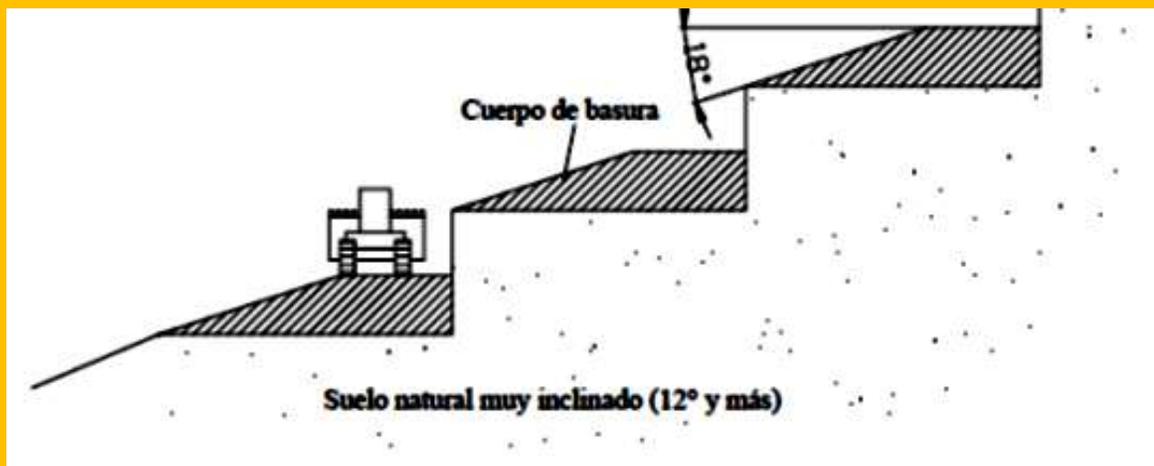
Fuente: Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales, Robén Eva, Loja, Ecuador, 2002

<sup>25</sup> Fuente: Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales, Robén Eva, Loja, Ecuador, 2002

**Figura 6.8: Relleno Sanitario Construido en Terrazas Sobre un Terreno Inclinado**



Relleno en terrazas para ganar más volumen



Construcción de terrazas al fin de compensar la inclinación extrema del terreno  
Construcción inestable en terrazas, por causa del crecimiento vertical exagerado y del talud demasiado inclinado

**Fuente:** Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales, Robén Eva, Loja, Ecuador, 2002

## 6.6 Sistema de colección de Lixiviados

Los lixiviados generados por la biodegradación propia de los residuos sólidos y por el paso del agua lluvia entre los residuos deben ser captados y conducidos hasta los sistemas de tratamientos. Los lixiviados son función básicamente de la composición física de los residuos y de la cantidad de agua que contengan.

En general, la puesta en marcha de un sistema de colección o captación y tratamiento de lixiviado incluye los siguientes pasos:

- La identificación y selección del tipo de revestimiento;
- La preparación de un plan de nivelación del sitio, incluyendo la ubicación de los canales y las tuberías para la colección y remoción del lixiviado.
- El diseño de las instalaciones para la colección o captación, la remoción y el almacenamiento de lixiviado
- La selección y el diseño del sistema de manejo (por ejemplo, tratamiento) de lixiviado.

La finalidad central de una instalación para la colección de lixiviado es captar el lixiviado en el relleno sanitario. La cantidad de lixiviado dentro del relleno sanitario debe mantenerse al mínimo porque la presión de agua puede forzar el lixiviado a través de un revestimiento permeable o a través de

cualquier imperfección en el revestimiento, y afectar de manera negativa la integridad y las propiedades del revestimiento.

El tamaño relativo de la instalación para la colección de lixiviado depende de las condiciones climáticas, la topografía del sitio, los procedimientos operativos y la cantidad de lixiviado esperada. La instalación debe hacerse de tal manera que sea compatible con el contorno de la base del relleno sanitario y con el sistema de revestimiento. El diseño debe hacerse de modo tal que el sistema de colección de lixiviado funcione como una unidad eficaz de drenaje y debe prevenirse, en todo momento, la obstrucción de sus componentes.

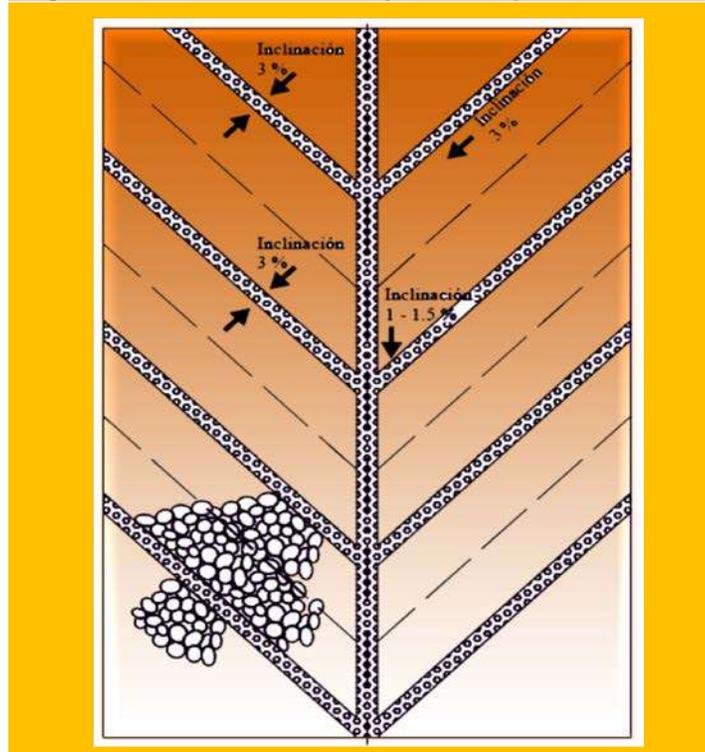
El sistema de drenaje desempeña una función importante en el funcionamiento del sistema de colección de lixiviado y realiza dos funciones claves:

- a) Proporciona una ruta para que el lixiviado migre fácilmente y de preferencia hacia las tuberías para la colección.
- b) Ofrece protección al revestimiento de la base contra los residuos sólidos depositados en la primera franja y contra el equipo pesado.

### 6.6.1 Sistema de captación de Lixiviados

Los diseños de los sistemas de captación, más comunes consisten de un revestimiento con canales, poco profundos, inclinados y en forma de V o espina de pescado; cada uno de los canales tiene una tubería de captación ubicada en el ápice invertido del canal.

**Figura 6.9: Sistema de Drenaje Interno para Lixiviados**



**Fuente:** Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales, Robén Eva, Loja, Ecuador, 2002

La eficiencia del sistema de captación de lixiviados depende mucho de la conductividad hidráulica de la capa de drenaje. A medida que la conductividad hidráulica disminuye, la tasa de remoción de lixiviado disminuye y, por lo tanto el líquido se acumula en la base del relleno sanitario.

Comúnmente, las tuberías para la colección de lixiviado son perforadas y tienen un diámetro de 10 cm. El diámetro de los tubos puede variar entre 4" y 10", dependiendo de la cantidad de residuos sólidos a depositarse y la precipitación pluvial.

El espacio entre las tuberías para la colección de lixiviado es de 10 a 20 m y ellas están cubiertas con una capa de arena o grava (capa de drenaje). En general, la capa de drenaje tiene 60 cm de espesor y se coloca en las tuberías antes que cualquier residuo sólido sea dispuesto en el sitio. Se puede colocar tela de filtro (geotextil filtrante) sobre la capa de drenaje para evitar obstrucciones y colmataciones de las gravas. Generalmente, la primera capa de residuos sólidos (cerca de 1m de espesor) colocada sobre la capa de drenaje no se compacta. La base de relleno sanitario se inclina entre 1% y 2% para promover el flujo del lixiviado hacia los puntos de colección. Las tuberías para la colección de lixiviado deben estar instaladas de manera tal que sean drenadas por gravedad hasta el punto de colección.

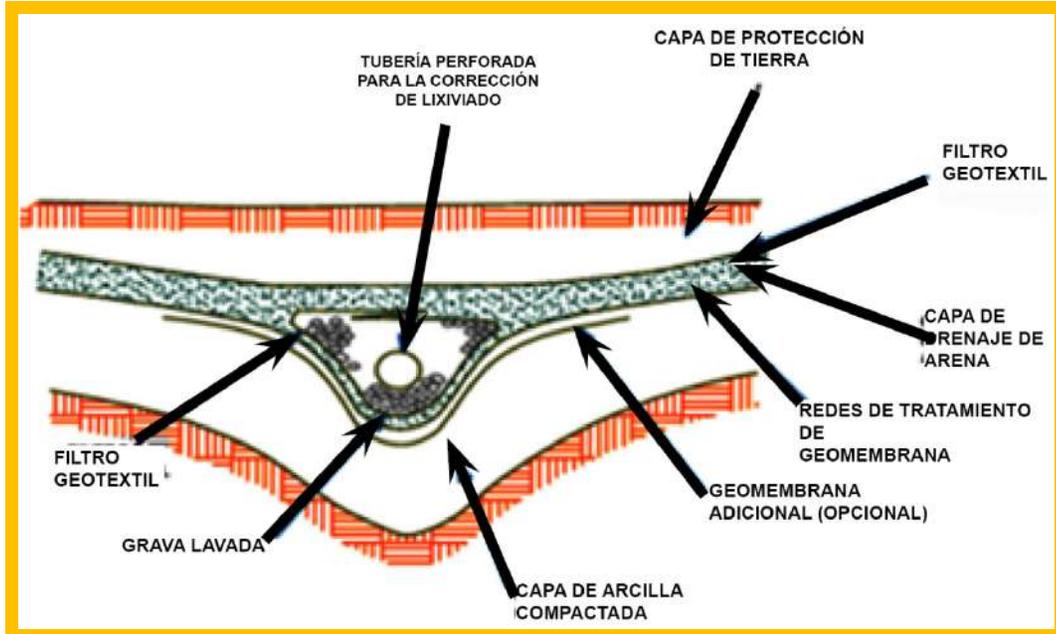
Este método puede permitir también el uso de tuberías para eliminar el agua proveniente de las lluvias en la porción de relleno sanitario que no recibe residuos sólidos. En esta forma, las tuberías para la colección de lixiviado están conectadas directamente a las tuberías para la colección del agua proveniente de las lluvias. Una vez que la porción del relleno sanitario empieza a funcionar, las tuberías se desconectan del sistema de aguas pluviales y se unen al sistema de colección de lixiviado.

**Figura 6.10: Sistema de Drenaje Interno para Lixiviados con Tubería de PVC**



**Fuente:** Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales, Robén Eva, Loja, Ecuador, 2002  
Gobierno Autónomo Municipal de Tiquipaya

**Figura 6.11: Detalle de una Tubería para Colección de Lixiviado**

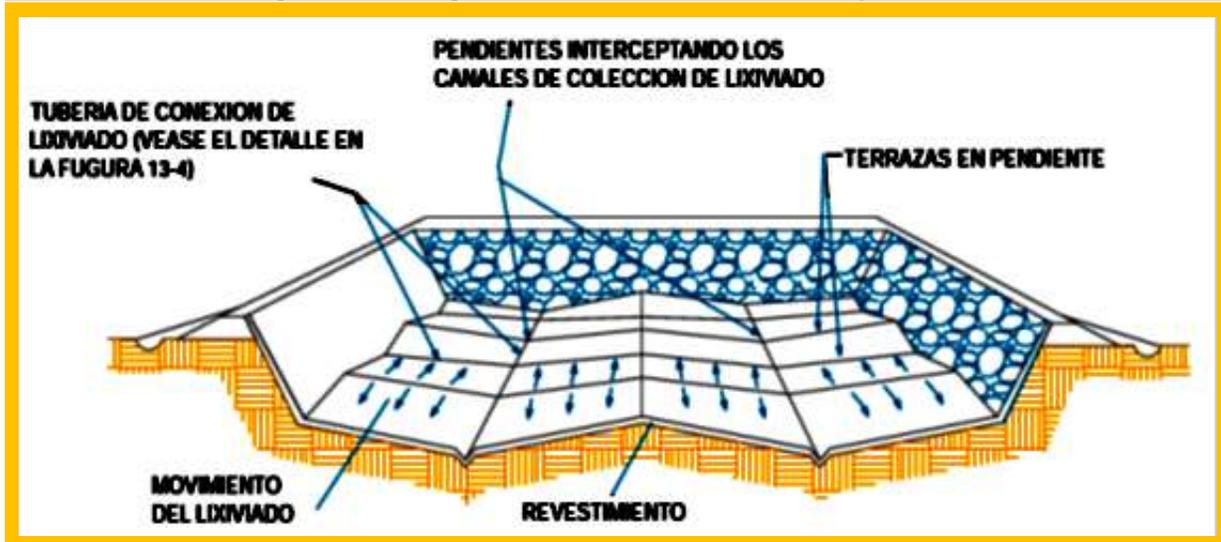


**Fuente:** Guía de diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de rellenos sanitario mecanizado, Sandoval L, Perú

### ♻️ Sistema de Terrazas

En el sistema de terrazas en pendiente, la base del relleno sanitario se inclina en una serie de terrazas (entre 1% y 5%), de manera tal que el lixiviado fluye hacia los canales de colección. Cada canal de colección consta de tuberías para la colección de lixiviado, perforadas y rodeadas de grava lavada (cerca de 4 a 5 cm). Como se había indicado, para prevenir la obstrucción de la grava, se puede colocar una capa de protectora de filtro geotextil. Los canales de drenaje se inclinan 0,5% y 1,0%, la longitud del canal de drenaje depende de la capacidad de las instalaciones de drenaje.

**Figura 6.12: Diagrama del diseño de terrazas en pendiente**



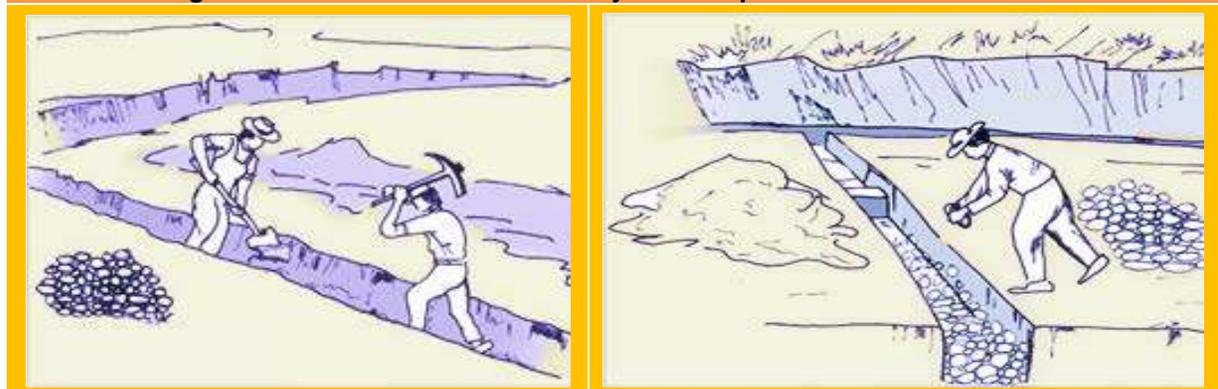
**Fuente:** Guía de diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de rellenos sanitario mecanizado, Sandoval L, Perú

### 6.6.1.1 Drenaje de Grava

En rellenos sanitarios manuales, puede emplearse como capa de drenaje, la grava (preferentemente redondeada, libre de raíces, vegetación y escombros de la construcción), arena gruesa o una mezcla de arena y grava. En todos los casos debe emplearse materiales más permeables.

Las piedras utilizadas deben tener dimensiones más o menos homogéneas con dimensiones de 6" a 8" y no contener partículas finas, con lo cual puede asegurarse buena permeabilidad hidráulica. El espesor hidráulicamente eficiente debe ser al menos de 30 cm. Así mismo, es recomendable construir una capa con espesor de 50 cm con el fin de proteger la permeabilidad hidráulica durante varios años.

**Figura 6.13: Construcción de Drenaje Interno para Lixiviados con Grava**



Fuente: Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales, Jaramillo

### 6.6.2 Filtros captadores de lixiviados

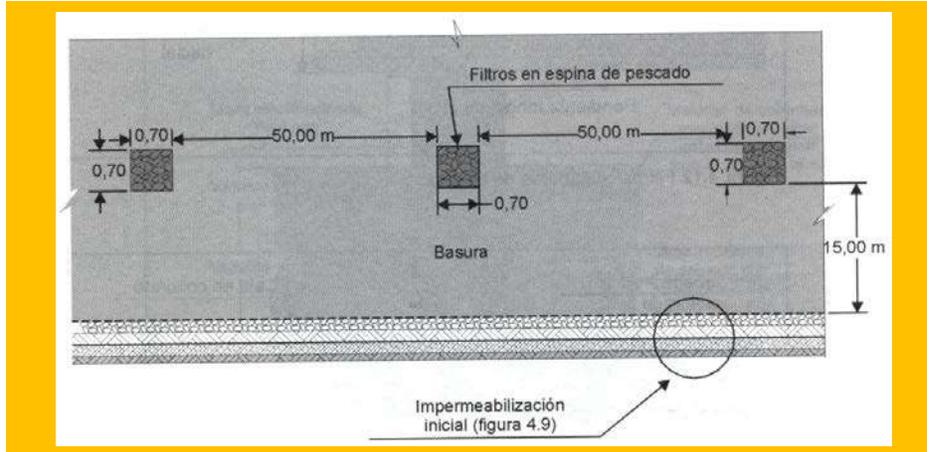
Los sistemas de drenaje de lixiviado pueden incluir más de una capa de filtros como el geotextil o materiales reemplazantes sobre la capa de drenaje, a fin de evitar que se congestione la capa con partículas sólidas sedimentadas en las aguas lixiviadas.

En rellenos sanitarios con alturas mayores de 15 m es necesario hacer estudios hidráulicos para el manejo de las presiones piezométricas y evitar el aumento de la presión de poros dentro de la masa de residuos, que puede causar problemas de inestabilidad. Para disminuir la presión de poros, se pueden colocar filtros de piedra, por lo menos cada quince metros, de acuerdo con el diseño hidráulico y de estabilidad realizados para el relleno sanitario.

Los filtros captadores de lixiviados dentro del relleno sanitario irán por la parte del talud de tal manera que se puedan sacar del área del relleno sanitario y conducido a un sistema de tratamiento. (Figura 6.14)

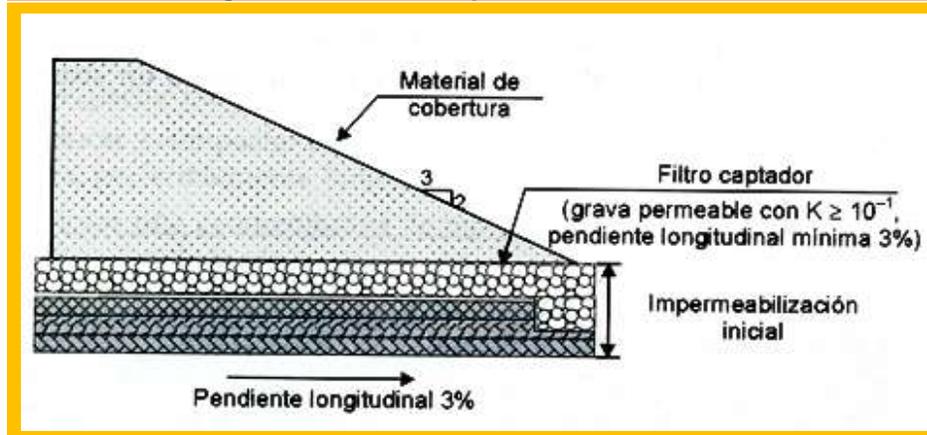
La pendiente longitudinal de estos filtros debe ser siempre mayor que 3%; una que salgan del relleno sanitario, los filtros se podrán cambiar por tubería de diámetro mínimo de 15 cm, que los lleve al sistema de almacenamiento y luego al sistema de tratamiento. Todo el sistema de manejo de lixiviados deberá estar construido en su totalidad antes de iniciar la operación del mismo. A continuación, se muestra un posible empalme entre un filtro y un sistema de tubería (Figura 6.15)

**Figura 6.14: Filtros para rellenos sanitarios con altura superiores a 15 m**

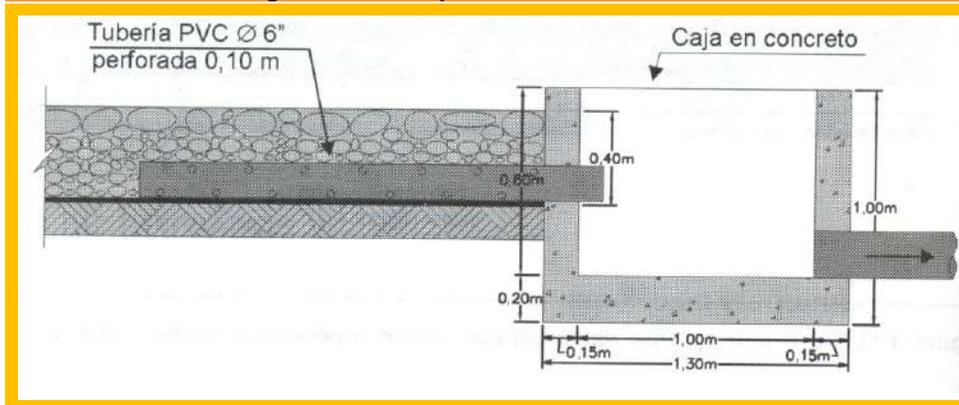


Fuente: Diseño y Operación de Rellenos Sanitarios, Collazos Héctor, Colombia, 2012

**Figura 6.15: Filtros captadores de lixiviados**



**Figura 6.16: Empalme de filtro a tubería**



Fuente: Diseño y Operación de Rellenos Sanitarios, Collazos Héctor, Colombia, 2012

### 6.6.3 Sistema externo de captación y conducción de lixiviados a tratamiento

Posterior al sistema de colección interno en las celdas de disposición de residuos sólidos, se debe instalar la captación de los lixiviados y su transporte a un sistema de tratamiento. Lo más habitual es la captación por bombeo de los pozos de colección de la base del relleno y posterior traslado con tuberías

a las piscinas de almacenamiento de lixiviados. En otros casos, la conducción de los lixiviados puede ser realizada por gravedad a través de tuberías.

Un sistema de conducción superficial puede ser la construcción de zanjas con bases impermeabilizadas de arcilla y recubiertas por mortero y hormigón pobre, las mismas deben tener una pendiente longitudinal de 1,5 a 2% y transversal hasta el 3%, dependiendo las condiciones topográficas, con la finalidad de conducir los lixiviados hacia las plantas de tratamiento.



Fuente: Diseño y Operación de Rellenos Sanitarios, Collazos Héctor, Colombia, 2012

El sistema de captación y conducción de lixiviados debe ser construido de tal forma que sirva para todas las celdas del relleno sanitario y dirigido a la cota más baja del sitio elegido, donde se recomienda tener un sistema de retención de los lixiviados y la planta de tratamiento.

#### 6.6.4 Piscinas de almacenamiento

De acuerdo a los cálculos del volumen de lixiviado generado que se han detallado en los capítulos anteriores, deberán construirse las piscinas o balsas de almacenamiento considerando aquellos materiales necesarios para garantizar la impermeabilización de la piscina; por ejemplo con geomembrana de PEAD.

### 6.7 Sistema de Drenaje Pasivo para Gases del Relleno Sanitario

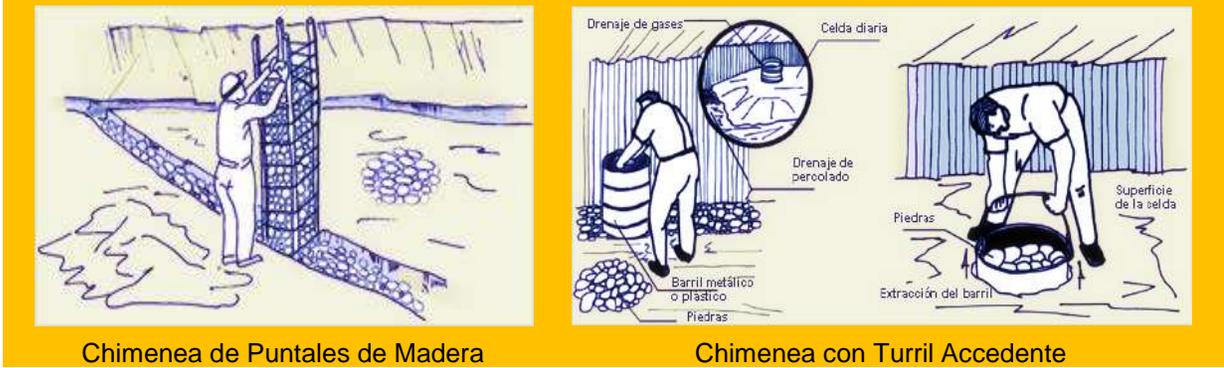
#### 6.7.1 Construcción de Chimeneas para un Relleno Sanitario Manual

Para rellenos sanitarios manuales es aconsejable construir las chimeneas con una diámetro de 0,3 a 0,5 metros, separadas de 20 a 50 metros, considerando mínimamente una por celda de disposición final cuando el relleno sanitario manual es relativamente pequeño y no cuenta con celdas de más de 2.500 m<sup>2</sup>.

Estas chimeneas se construyen de forma vertical a medida que avanza el relleno sanitario y desde la base del mismo, procurando que el entorno de la chimenea este bien compactada. Los materiales de construcción pueden ser diversos pero se aconseja utilizar puntales de madera, con trabas a cada metro, recubiertos por malla olímpica o malla de gallinero, rellenos de piedra con diámetros de 4" o 6"

u otro tipo de material como piedra partida o grabas de dimensiones mayores a los 4 cm, con el fin de garantizar el flujo del gas durante la vida útil del relleno y su posterior cierre técnico.

**Figura 6.17: Forma de Construcción de las Chimeneas en Rellenos Manuales**



Fuente: Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales, Jaramillo

### 6.7.2 Construcción de las Chimeneas Relleno Sanitario Mecanizado

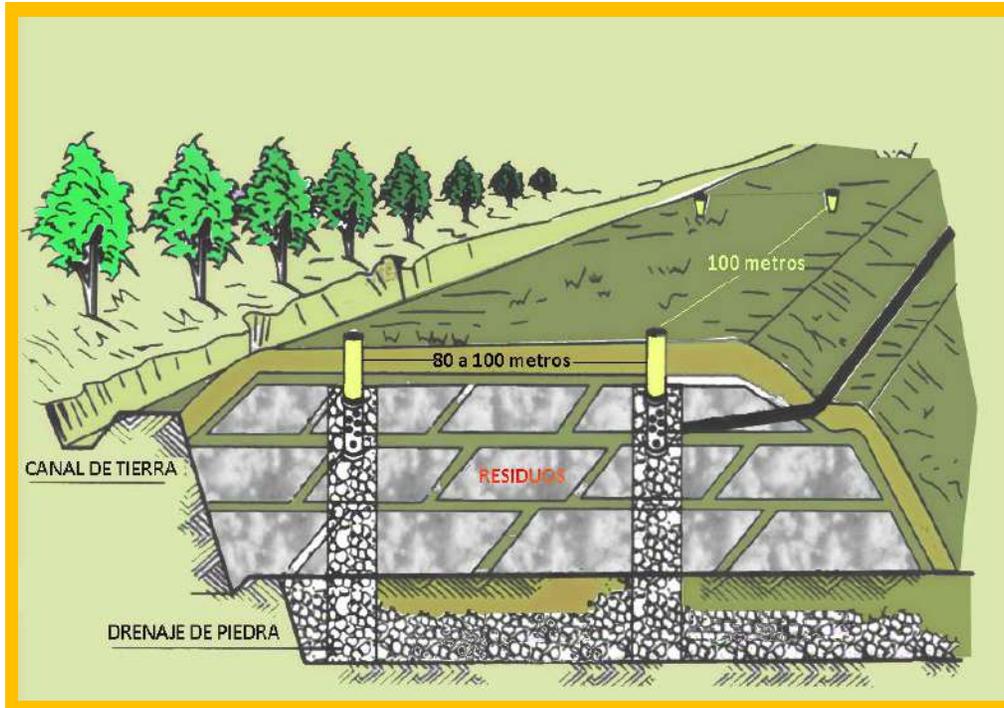
Para rellenos mecanizados se recomienda, chimeneas de 0,6 a 1,2 m de diámetro y separadas a criterio del técnico en función del radio de influencia que se identifique (de 25 m a 35 m). Estas chimeneas deben ser construidas de forma vertical, iniciando su construcción en la base del relleno sanitario.

Es aconsejable que sea mediante un tubo metálico implantado en la base del relleno sanitario, el cual es relleno con piedra de 6" a 8" para garantizar que no exista obstrucción durante la vida útil del relleno y su posterior cierre, o con tubo de PVC de 6" perforado y rodeado de piedra para favorecer el drenaje en su alrededor.

**Figura 6.18: Detalles del Sistema del dren para Gas de Relleno Sanitario**



**Figura 6.18: Detalles del Sistema del dren para Gas de Relleno Sanitario**



**Fuente:** Guía de diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de rellenos sanitario mecanizado, Sandoval L, Perú

La colección del gas del relleno sanitario se hace mediante una red de pozos espaciados estratégicamente con materiales de elevada permeabilidad a través de los cuales el gas puede pasar fácilmente e introducirse al sistema de tuberías.

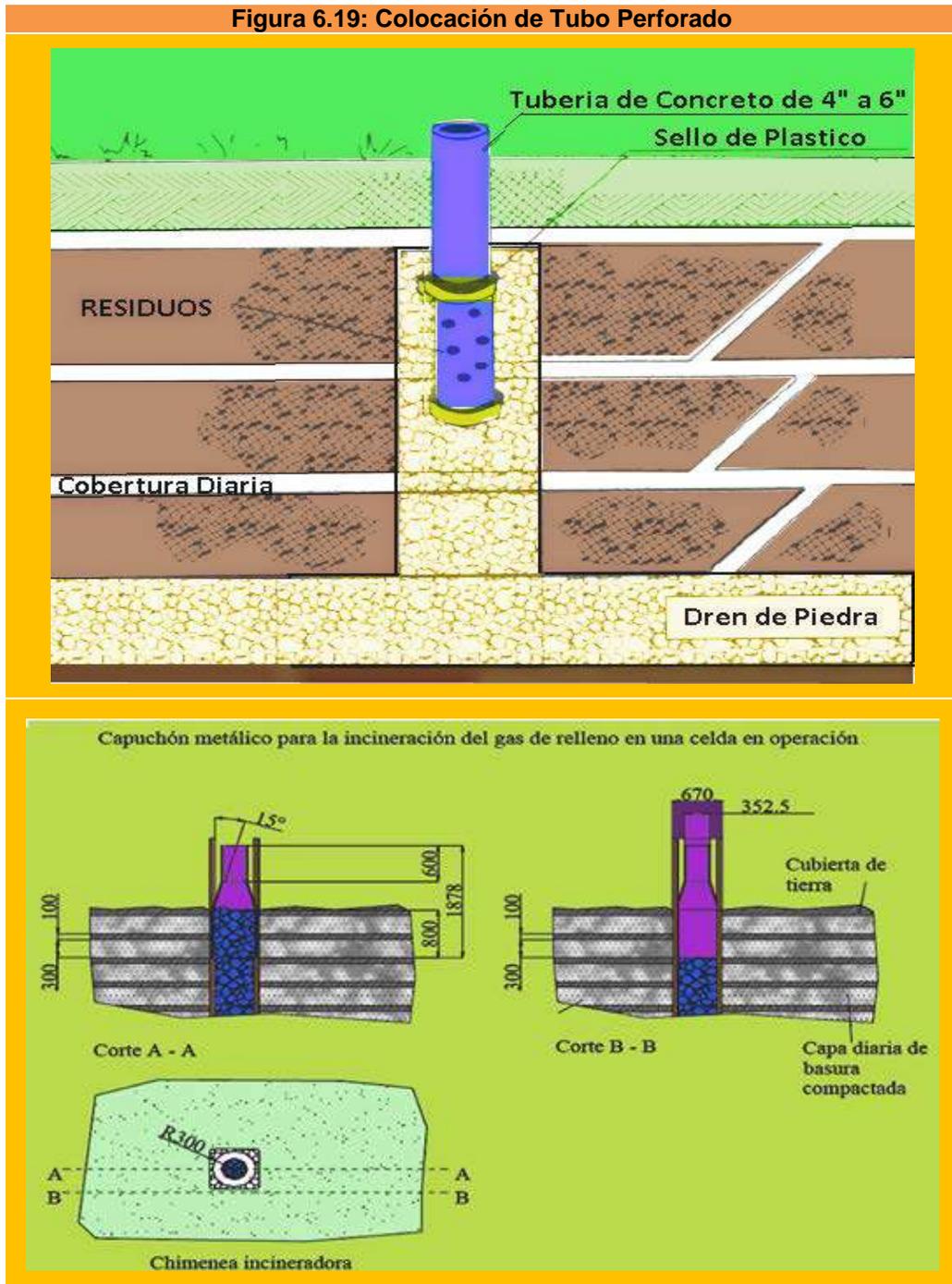
### 6.7.3 Quema de los gases producidos en el relleno sanitario

Si se realiza el drenaje pasivo con chimeneas, es muy importante que se queme el gas que sale de las mismas, caso contrario las chimeneas constituyen un peligro importante para los obreros que trabajan en el relleno sanitario, porque los gases salen casi sin dilución de las chimeneas, causando daños a la salud y al medio ambiente.

Si no se controla el gas generado dentro del relleno sanitario, se dispersará y migrará fuera de sus límites. El gas acumulado, la dispersión y la migración incontroladas pueden representar una situación potencialmente peligrosa debido a varias características del gas del relleno sanitario, tales como el riesgo de inflamación y el potencial de causar asfixia, además las concentraciones orgánicas pueden inhibir el crecimiento de la vegetación en la cobertura.

A pesar que la ventilación del gas del relleno sanitario a la atmósfera evita problemas potenciales locales e impactos adversos, este enfoque contribuye al efecto global de invernadero. En consecuencia, debe realizarse todo esfuerzo para coleccionar y usar el gas o quemarlo mediante un sistema de quemadores adecuadamente diseñados, pudiendo hacerlo dentro de la chimenea, protegiendo los puntales y la malla con un tubo de hormigón o un capuchón metálico.

**Figura 6.19: Colocación de Tubo Perforado**



**Fuente:** Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales, Robén Eva, Loja, Ecuador, 2002

Es importante diseñar un buen sistema de finalización o capuchón de la tubería de ventilación de gases.

De ser posible debe tratarse de implementar un sistema de captación activa y conjunta del biogás mediante bomba de aspiración y conducción con ductos para que éste sea quemado en antorcha de combustión. El sistema es mucho más seguro y efectivo.

## 6.8 Obras Complementarias

Antes de entrar en la etapa de operación, el relleno sanitario deberá contar con una serie de obras complementarias mínimas, que se detallan a continuación:

- ✓ Cartel de información y señalización
- ✓ Cerca perimetral
- ✓ Puerta y caseta de vigilancia
- ✓ Caseta de pesaje y báscula (si aplica)
- ✓ Área administrativa (si aplica)
- ✓ Área para servicios de primeros auxilios
- ✓ Servicios sanitarios y eléctricos
- ✓ Almacén (si aplica)
- ✓ Área de mantenimiento de maquinaria y equipo (si aplica)
- ✓ Área de amortiguamiento
- ✓ Caminos internos
- ✓ Canales para aguas de escorrentía

### 6.8.1 Cartel de información y Señalización

Antes de empezar cualquier labor en un relleno sanitario, se debe dar la información correspondiente a la comunidad a través de medios de comunicación, indicando cuándo se inician las obras, en qué consisten, cuál debe ser la participación de los usuarios y cuál será su empleo futuro. Asimismo, se debe colocar un cartel, que tenga como mínimo con la siguiente información:

*Nombre del municipio; Nombre de la empresa que presta el servicio y su identificación; Nombre del relleno sanitario y alguna identificación con un mensaje propio.*

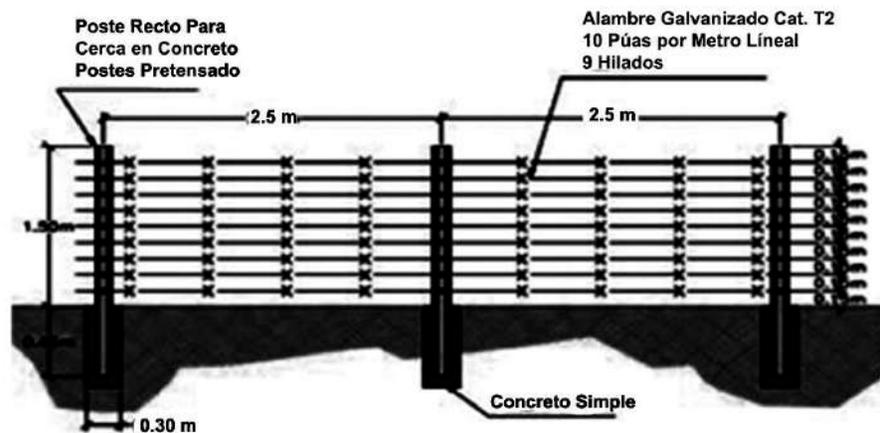
Es clave mantener en el relleno sanitario a una persona que pueda dar información sobre las obras que se realizan.

### 6.8.2 Cerca perimetral y cerco vivo de árboles

El relleno sanitario debe estar cercado, como mínimo con alambre de púas de cinco hilos de 1.50 m de alto, partir del nivel del suelo con postes de madera, hormigón o tubos galvanizados, debidamente empotrados y colocados a cada 2.5 m entre sí, con alambre de púas entreverados cada 0.15 m.

Es también necesaria la conformación de un cerco vivo de árboles y arbustos como aislamiento visual, pues protege de los vecinos y transeúntes la vista hacia los trabajos que se realizan, da buena apariencia estética al contorno del terreno, y puede servir para retener papeles y plásticos levantados por el viento. Se recomienda plantar árboles de rápido crecimiento como el pino ciprés, eucalipto, bambú, etc.

**Figura 6.20: Cerca Típica y Cortina Arbórea del Relleno Sanitario**



**Fuente:** Guía Ambiental para el saneamiento y cierre de botaderos a Cielo Abierto, Ministerio de Medio Ambiente, Colombia, 2002

### 6.8.3 Puerta y Caseta de vigilancia

La puerta del relleno sanitario, al igual que el cerco, forma parte del sistema de seguridad para impedir la entrada de animales y para que no entren personas sin autorización.

De igual manera, la construcción de la caseta es importante para ser usada como: portería, lugar para guardar las herramientas, cambio de ropa (antes y después del trabajo) e instalaciones sanitarias. Esta caseta deberá instalarse a la entrada del relleno sanitario, pudiendo ser construida con materiales propios de cada región y de acuerdo a las necesidades del tipo de relleno sanitario a construir y personal que trabajar en el sitio.

### 6.8.4 Caseta de pesaje

La caseta de registro, a la entrada del relleno sanitario, tiene como función principal operar los controles de entrada de residuos y ser figurativamente "la memoria del relleno sanitario". Esta debe ser independiente y estar diseñada para controlar la entrada y salida de todo el personal, tanto de empleados como de visitantes.

**Figura 6.21: Caseta de pesaje**



Fuente: Empresa Municipal de Aseo Santa Cruz

### 6.8.5 Báscula de Pesaje

Un relleno sanitario para poblaciones con más de 100.000 habitantes debe tener como mínimo una báscula o balanza donde se pueda pesar los residuos que ingresan. Las características de la báscula dependen de la cantidad de residuos que lleguen al relleno sanitario, de los vehículos que la transportan y del presupuesto disponible. Lo óptimo será una báscula con capacidad de 50 toneladas.

Idealmente, la plataforma debe ser lo suficientemente larga para acomodar todos los ejes del vehículo de manera simultánea. Dependiendo el tráfico del parque vehicular podrá considerarse la instalación de una segunda báscula.

La información mínima que deberá registrarse es la siguiente:

- ✓ Fecha
- ✓ Número consecutivo del registro
- ✓ Identificación del vehículo
- ✓ Hora de entrada
- ✓ Hora de salida
- ✓ Tipo de residuo
- ✓ Peso neto
- ✓ Sitio de donde procede

Las balanzas para pesar vehículos están disponibles en dos tipos básicos con algunas variaciones para cada uno de ellos: 1) De Fosa y 2) De bajo perfil.

#### De Fosa

Una balanza para pesar camiones puede ser instalada en una fosa y con la plataforma a nivel del piso o sobre piso y generalmente con rampas de acceso. Una balanza en fosa es generalmente un poco más costosa que una plataforma sobre piso, pero facilita el acceso a sus componentes y no requiere generalmente de rampas de ingreso y salida para que el vehículo suba a la plataforma por encontrarse esta al mismo nivel de la pista.

Por otro lado, una balanza en fosa requiere de otras consideraciones adicionales, como por ejemplo, la acumulación de agua que obliga a instalar un eficiente sistema de desagüe o al uso de un sistema de bombeo y es lógicamente más costosa, pues su construcción requiere de la excavación previa de una fosa, vaciado y fraguado de piso y paredes laterales, etc.

## De Bajo perfil

Las balanzas para camiones instaladas sobre el piso, generalmente designadas como modelos de bajo perfil, pueden ser instaladas en una mini-fosa con la plataforma a nivel del piso o sobre piso, con rampas de acceso. En este caso será necesario instalar rampas en ambos extremos de la plataforma. Este tipo de balanza está equipada muchas veces con guardarieles para evitar que el conductor caiga por un lado al hacer una mala maniobra.

### Tamaño de la plataforma

Una balanza para pesar vehículos es simplemente una plataforma soportada por uno o más elementos sensores de peso que producen una salida directamente proporcional a la carga aplicada sobre la plataforma.

El tamaño de la plataforma es un factor importante, puesto que después de comprada e instalada la balanza, es prácticamente imposible cambiar el tamaño de la plataforma. Considerando que la vida útil de una balanza para camiones es de 10 años o significativamente más, debe estimarse que vehículos pesarán en la balanza en los próximos 5 a 10 años a partir de la fecha.

Las balanzas para pesar vehículos se fabrican típicamente con anchos de 3,0; 3,3; 3,6 ó 4,5 m y excepcionalmente mayores. El largo puede variar entre 6,0 y 60,0 m. Si el tamaño aumenta, el costo también, por lo que hay que seleccionar el menor tamaño que se adapte a los vehículos que se pesan actualmente, pero que sea lo suficientemente larga para acomodar sin problemas los vehículos que se puedan presentar en el futuro.

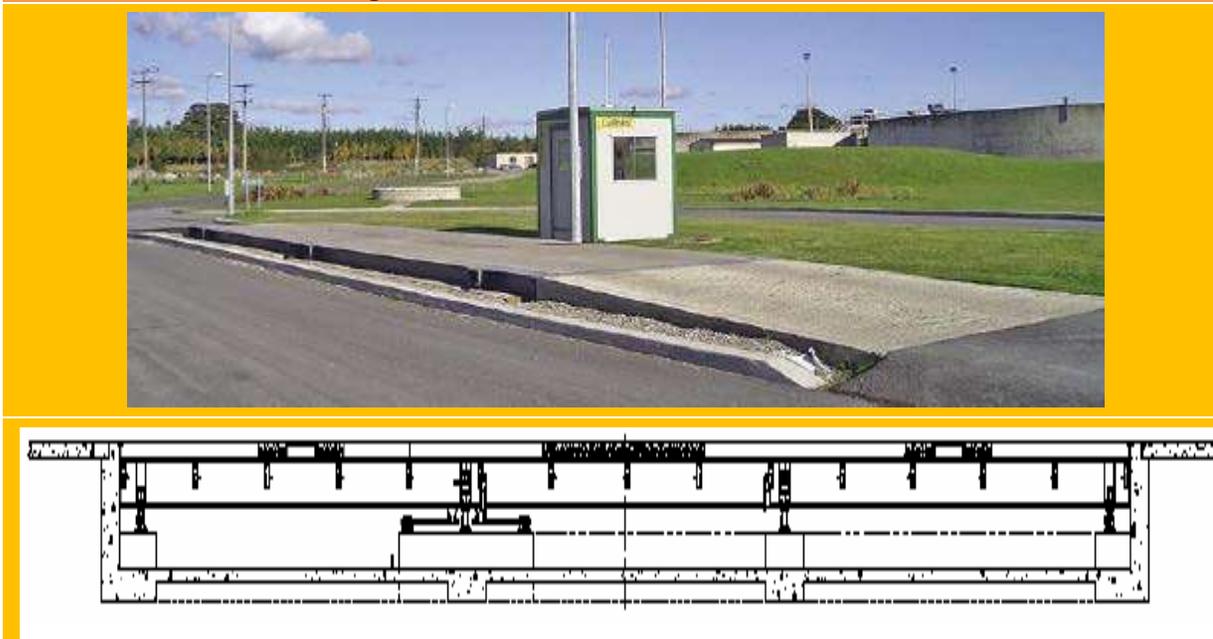
Normalmente las plataformas están disponibles con uno de dos materiales: acero o concreto.

**Figura 6.22: Balanza de Bajo Perfil**



Fuente: Guía de Balanzas para Camiones, Cardinal Scale Manufacturing, Co.

**Figura 6.23: Balanza instalada en mini fosa**



Fuente: Guía de Balanzas para Camiones, Cardinal Scale Manufacturing, Co.

### 6.8.6 Área administrativa

Las instalaciones administrativas dependen de la magnitud y complejidad del relleno sanitario. En rellenos sanitarios mecanizados, es recomendable contar con mayores condiciones de infraestructura y ergonomía para los empleados de acuerdo a las normas laborales.

### 6.8.7 Área de para servicios de primeros auxilios

Las instalaciones de servicios de primeros auxilios, son importantes para el personal operativo del relleno sanitario, puesto que al estar expuestos permanentemente al contacto con los residuos sólidos, existe el riesgo que puedan sufrir lesiones o accidentes que afecten a la salud y seguridad física de los mismos.

### 6.8.8 Instalaciones sanitarias y eléctricas

Un relleno sanitario convencional debe contar con los servicios de saneamiento básico y las instalaciones eléctricas. El agua debe estar disponible para bebida, control de incendios, control de polvo y aseo de los empleados.

Los servicios sanitarios se instalaran conforme a los requisitos que establezcan las disposiciones aplicables, siendo obligatorio un sanitario por cada 8 obreros de acuerdo al reglamento de Seguridad e Higiene Ocupacional de la Ley General del Trabajo.

Si en el caso que el acceso al alcantarillado sea difícil las aguas residuales domésticas pueden descargarse en un sistema séptico o utilizar un sistema aislado de disposición de excretas.

### 6.8.9 Almacén

Si el tamaño del relleno sanitario lo amerita, se deberá construir un cobertizo para guardar equipos, herramientas, materiales que sean de uso para el relleno, el tamaño dependerá del equipo que se disponga.

### 6.8.10 Área de Mantenimiento

Para rellenos sanitarios mecanizados se deberá contar un galpón para el mantenimiento preventivo de toda la maquinaria, vehículos y equipos que se cuente. Esta área debe ser cubierta para el trabajo en todo tipo de condiciones climáticas.

### 6.8.11 Área de amortiguamiento

El área de amortiguamiento deberá diseñarse y construirse en un espacio perimetral que fluctúe entre 30 m y 50 m del relleno sanitario. Esta franja deberá estar forestada con especies vegetales de talla y follaje suficiente para que reduzca la salida de polvos, ruidos y materiales ligeros durante la operación.

### 6.8.12 Caminos internos

En un relleno sanitario existen tres tipos de vías:

- ♻️ Las vías principales son las que llegan al relleno sanitario desde el exterior, es decir, comunican la operación de la recolección y transporte con la operación misma de la disposición final. Son permanentes y pueden servir para toda la vida útil del relleno sanitario y, en muchas ocasiones, para el uso futuro. Generalmente, el terreno de fundación está conformado por los suelos del sitio, se diseñan con la capa superior estable, impermeable, uniforme y de textura adecuada, la vía no debe tener ningún tramo sobre residuos. Las pendientes longitudinales no deben ser mayores de 8% y no deben tener curvas con radios menores de 50 metros. El ancho de calzada puede ser siete metros.
- ♻️ Las vías secundarias son, generalmente, vías perimetrales del relleno sanitario y deben permitir el acceso a cada uno de los niveles que lo conforman. El terreno de fundación, generalmente en el tramo inicial, debe conformarse con los suelos del sitio y el tramo restante sobre residuos. Las pendientes longitudinales pueden llegar máximo hasta 6% y se diseñan para evitar, el patinado de los vehículos. En lo posible la capa superior debe estar conformada con una sub-base granular, con un mínimo de 25 cm de espesor y un ancho de calzada de 10,50 m. Al igual que la vía principal, no debe tener curvas con radios menores de 50 m y en situaciones topográficas difíciles, hasta 30 m.
- ♻️ Las vías temporales, como su nombre lo indica, son vías de corta duración y solamente permiten el acceso al frente de la celda diaria de trabajo. Se caracterizan porque su diseño depende de los aspectos operativos, los cuales tienen mucha relación con la forma el terreno y el clima. Para la construcción pueden usarse la cobertura intermedia y los equipos empleados para la compactación de los residuos. Estas vías deben garantizar el acceso a los diferentes frentes de trabajo (o de operación) y se pueden construir sobre los mismos pisos de los niveles de residuos. El terreno de fundación en toda la vía está conformado por residuos. Las pendientes longitudinales son función de las pendientes de los niveles y no deben superar el 3%.

### 6.8.13 Canales de agua para escorrentía

Los canales para el control de aguas de escorrentía son estructuras que no tienen características especiales. Son interceptores para desviar las aguas de lluvias y evitar que pase sobre la residuos sólidos, penetren y aumente los caudales de lixiviados.

Por lo general, en los rellenos sanitarios los canales interceptores de aguas de escorrentía se diseñan de acuerdo con la vida útil de cada banquina con residuos. Estas estructuras son repetitivas, a medida que va avanzado el relleno sanitario en forma vertical.

Así mismo, deberán preverse una zanja perimetral para la recolección de aguas de lluvia que deberá ser diseñada de acuerdo a los cálculos de pluviometría de la zona y deberá garantizar que no ingrese agua en el relleno.

#### **6.8.14 Playa de Descargue**

Es el lugar que une la vía interna con el sitio donde el vehículo va a depositar su carga y que se denomina “frente de trabajo”. Es en este lugar que el transportador entrega su carga y empieza el manejo de los residuos en el relleno sanitario.

Se constituye en un área amplia donde los vehículos entran de frente y hacen un giro de 180° para la operación de descarga.



# **CAPÍTULO VII: OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL RELLENO SANITARIO**



## CAPITULO VII: OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL RELLENO SANITARIO

### 7.1 Recursos Técnicos y Humanos

Los siguientes criterios determinan la cantidad y las características del personal necesario para la operación y mantenimiento de un relleno sanitario, sea este manual, semimecanizado o mecanizado:

- ✓ Área del relleno
- ✓ Cantidad diaria de desechos descargados
- ✓ Cantidad diaria de vehículos
- ✓ El tipo de los desechos (domiciliarios clasificados o no clasificados, industriales, hospitalarios, peligrosos o no peligrosos)
- ✓ Estándares y leyes vigentes de protección del medio ambiente y de calidad
- ✓ Disponibilidad y material de cobertura
- ✓ Días laborables en el relleno
- ✓ Duración de la jornada diaria
- ✓ Condiciones del clima
- ✓ Rendimiento de los trabajadores
- ✓ Maquinaria, equipos y herramientas con las que se cuenta.

**Cuadro 7.1: Número Aproximado de Personal Necesario para un Relleno Sanitario**

Personal Requerido		Relleno con Compactación		Personal para Relleno Manual
		Personal para Relleno Mecanizado	Personal para Relleno Semimecanizado	
Jefe de Relleno Sanitario		1	1	0
Ayudante del Jefe de relleno		0	1	0
Técnico de laboratorio o químico		0	1	0
Chofer de Maquinaria pesada (tractor, oruga, pala, retroexcavadora)		2	3	0
Mecánico para reparación de maquinaria pesada.		1	1	0
Técnico mecánico para reparación de vehículos y otros equipos.		0	1	0
Responsable de balanza y portería		1	2	1
Obreros para el relleno	Colocado, compactado y cubierta de residuos	3	6	8
	Construcción de chimeneas			
	Limpieza de Canales de drenaje y cunetas			
Mantenimiento de planta de tratamiento de lixiviados				
<b>Total de Personal</b>		<b>8</b>	<b>16</b>	<b>9</b>

En el caso de rellenos sanitarios manuales es muy importante tener el número de obreros suficiente para un buen funcionamiento. El rendimiento de los obreros en un relleno sanitario manual se calcula como se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 7.2: Rendimiento de los Obreros en Relleno Sanitario Manual	
Actividad	Personal requerido para esta actividad
Colocado de los residuos =	$\frac{Desechos.solidos(tn/dia)}{0.95(tn/hora - hombre)} \times \frac{1}{horas.trabajo.por.dia} \times \frac{7}{dias.laborables.por.semana} = (hombres / dia)$
Compactación de los residuos =	$\frac{Area.superficial(m^2)}{20 m^2(hora - hombre)} \times \frac{1}{horas.trabajo.por.dia} \times \frac{7}{dias.laborables.por.semana} = (hombres / dia)$
Movimiento de tierra de cobertura =	$\frac{Tierra(m^3)}{0.35 a 0.7 m^3/(hora - hombre)} \times \frac{1}{horas.trabajo.por.dia} \times \frac{7}{dias.laborables.por.semana} = (hombres / dia)$
Cobertura diaria de los residuos con compactación =	$\frac{Area.superficial(m^2)}{20 m^2(hora - hombre)} \times \frac{1}{horas.trabajo.por.dia} \times \frac{7}{dias.laborables.por.semana} = (hombres / dia)$

Fuente: Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales, Jaramillo

### 7.1.1 Requerimiento de Herramientas

En el siguiente cuadro, se describen las actividades y herramientas más necesarias en un relleno sanitario manual. Estas mismas herramientas serán necesarias en un relleno sanitario semi-mecanizado o mecanizado puesto que son de apoyo.

Cuadro 7.3: Herramientas Mínimas Requeridas para el Relleno Sanitario Manual	
Herramienta	Actividad en que es requerida
<b>Pala</b>	Cargar, descargar y colocar residuos sólidos
	Cargar, descargar y colocar material de cobertura.
	Mantenimiento de drenes y cunetas.
	Mantenimiento de piscinas de lixiviados, retirando lodos.
<b>Azadón</b>	Aflojar el terreno
	Trabajos de arborización
	Mantenimiento de cunetas y canales de drenes
<b>Barra</b>	Aflojar terreno para excavaciones
	Trabajos de arborización
<b>Pico</b>	Remover el terreno para excavaciones
	Trabajos de arborización
	Mantenimiento de cunetas y canales de drenes
<b>Rastrillo</b>	Colocación de material de cobertura de forma homogénea.
<b>Pisón de mano</b>	Compactación manual de la residuos sólidos y conformación de taludes
<b>Machete</b>	Afilar palos y estacas
	Cortar árboles pequeños y arbustos para la preparación del terreno
<b>Sierra</b>	Cortar árboles, palos y otras maderas

Cuadro 7.3: Herramientas Mínimas Requeridas para el Relleno Sanitario Manual	
Herramienta	Actividad en que es requerida
Carretilla	Trasporte interno de residuos y material de cobertura
Rodillo Manual	Compactación de los residuos y cubierta con tierra

## 7.1.2 Seguridad e Higiene Ocupacional

El artículo 67º de la Ley de Higiene Seguridad Ocupacional y Bienestar (Decreto Ley N° 16998 2 agosto de 1979), establece el marco legal para la protección del trabajador en el medio ambiente laboral, “el empleador estará obligado a tomar todas las medidas necesarias para proteger eficazmente la vida y la salud de sus trabajadores”

### 7.1.2.1 Riesgos

Riesgo se refiere a condiciones o circunstancias futuras que existen fuera del control y que tendrán un impacto adverso en el proyecto si se llegan a presentar.

En los rellenos sanitarios generalmente se podrían presentar tres tipos de riesgos:

1. *Riesgos físicos*, generalmente asociados a ruidos y accidentes de caídas, pinchaduras, golpes de con maquinaria, deslizamientos, quemaduras.
2. *Riesgos mecánicos*, asociados al montaje, desmontaje y manejo de maquinaria pesada durante la construcción y mantenimiento.
3. *Riesgos químicos*, exposición a agentes químicos, como la gasolina, aceites, gases, pesticidas, ácidos y otros.
4. *Riesgos biológicos*, exposición a vectores, como ratas, insectos, perros y a la transmisión de enfermedades como la rabia canina, hepatitis, hantavirus, entre otros.

A continuación, se presentan los principales riesgos para la etapa de operación de rellenos sanitarios:

#### Contaminación Físico Química de los Cuerpos Agua superficiales

Se presenta cuando hay eventuales fugas de aguas residuales (lixiviados y aguas residuales) debido a daños en el sistema de impermeabilización o tratamiento. En consecuencia, la calidad físico-química e hidrobiológica de los cuerpos de agua cercanos a la zona del proyecto se verán deteriorados, afectando también la fauna y flora presente.

De presentarse fallas en el sistema de impermeabilización del relleno se estarán afectando las aguas superficiales y subterráneas presentes, en consecuencia para evitar estos incidentes se deberá mantener un sistema de inspección permanente de las infraestructuras de permeabilización del relleno y del sistema de tratamiento de lixiviados.

#### Desestabilización de Taludes

Durante la fase de operación puede existir el riesgo que se presenten movimientos de terreno si se presentan varios fenómenos al mismo tiempo. Esto produciría movimientos del terreno cuando en la construcción y operación del relleno no se siguen las recomendaciones del diseño. Estos movimientos pueden atentar contra la vida y salud de las personas que laboran en el área.

#### Incendios y Explosiones

Puede ocurrir por concentración de gases resultado de la degradación de los residuos. Su efecto puede ser incendios y exposiciones lo que podría generar la pérdida de vidas humanas, maquinaria o equipos.

Cuando el metano está presente en el aire en concentraciones entre el 5 – 15% es explosivo. Como en el relleno sólo están presentes cantidades limitadas de oxígeno, cuando las concentraciones de metano llegan a ese nivel crítico hay poco peligro de que el relleno sanitario vaya a explotar. Sin embargo, pueden formarse mezclas de metano que están dentro del rango explosivo si el gas del relleno migra fuera del lugar y se mezcla con el aire.

### **Sobrecarga de Lagunas de Tratamiento de Lixiviados por Aguas de Escorrentía**

Se puede presentar un aporte significativo de aguas de escorrentía al sistema de tratamiento de lixiviados. Esta situación podría causar el desbordamiento y por ende la contaminación del suelo y los cuerpos de agua.

### **Caída de Personas en Lagunas de Tratamiento de Lixiviados**

Durante la inspección de las lagunas de tratamiento de lixiviados o toma de muestras para análisis se puede presentar la caída del personal dentro de éstas, presentándose un alto riesgo de ahogamiento dada las características de este tipo de aguas.

### **Proliferación de Vectores de Contaminación**

Una de las características o consecuencias de la acumulación de residuos es la contaminación del aire; malos olores y proliferación de microorganismos, insectos, plagas, etc., que ocasionan daños a la salud de las personas, tanto dentro del relleno sanitario como en su área de influencia. Estos vectores puede ser significativos si no se siguen las recomendaciones de diseño del relleno sanitario, por lo tanto el administrador deberá aplicar el manual de operación del relleno y mantener un registro de sus actividades, a fin de evitar que se presente este tipo de contaminación.

En ese contexto, se deberán establecer los controles necesarios para prevenir o mitigar los riesgos presentes. Estos controles son:

1. **Control Operacional**, con el fin de lograr que las actividades operativas para la disposición final de residuos sólidos sean efectuadas en forma segura y eficiente.
2. **Control Ambiental**, durante la operación del relleno sanitario se debe implementar medidas preventivas y correctivas para eliminar o minimizar los impactos que sobre el entorno de los trabajadores pueda causar la emisión de contaminantes desde el sitio de disposición final. De esta forma es necesario establecer un plan de seguridad y salud ocupacional para evitar o minimizar accidentes laborales, así como un plan de contingencias.

#### **7.1.2.2 Plan de Contingencias**

El plan de contingencias contiene un grupo de recomendaciones básicas que deben ser consideradas, por quienes laboren en las diferentes etapas del proyecto del relleno sanitario (diseño, implementación, control, cierre), con el fin de que se encuentren listos para responder con prontitud ante cualquier emergencia a fin de reducir los efectos de la ocurrencia de eventos no deseados.

#### **7.1.2.3 Plan de Seguridad y Salud Ocupacional**

Contempla medidas que garanticen una prevención eficaz de los riesgos relacionados con la seguridad industrial y salud ocupacional del personal que labora en la fase de construcción y operación del proyecto. El objetivo es reducir al máximo la ocurrencia de accidentes de trabajo y mejorar las condiciones laborales para que los trabajadores realicen sus actividades en un ambiente sano y seguro.

#### 7.1.2.4 Capacitación

La capacitación a todo el personal del relleno sanitario, es indispensable. Una vez que se ha adquirido los conocimientos necesarios sobre los riesgos en el manejo o manipulación de los residuos sólidos, formación de celdas, sus peligros y medidas a tomar, es necesario comunicar eficazmente esta información a todo el personal involucrado.

Se debe llevar a cabo un programa de capacitación para garantizar que todo el personal sea entrenado adecuadamente en la manipulación de los residuos sólidos. Para asegurar la protección del trabajador es necesario capacitarlo sistemáticamente y de forma constante.

#### 7.1.2.5 Equipos de protección personal

En cumplimiento a normas laborales, es necesario que todo el personal del relleno sanitario cuente con los Equipos de Protección Personal (EPP) adecuados al trabajo a realizar. Los equipos de protección personal constituyen uno de los conceptos más básicos en cuanto a la seguridad en el lugar de trabajo y son necesarios cuando los peligros no han podido ser eliminados por completo o controlados por otros medios. Comprenden todos aquellos dispositivos, accesorios y vestimentas de diversos diseños que emplea el trabajador para protegerse contra posibles lesiones. En consecuencia, en un relleno sanitario se deberá contar como mínimo con lo siguiente:

**Figura 7.1: Ropa de Trabajo**

- ✓ Ropa de Trabajo (overoles)
- ✓ Ropa de Trabajo para época de lluvia (impermeables)
- ✓ Guantes de goma y de cuero.
- ✓ Botines de seguridad
- ✓ Botas de Goma para épocas de lluvia.
- ✓ Filtros o barbijos según el caso.



#### Requisitos de un Equipo de Protección Personal

- ✓ Proporcionar máximo confort y su peso debe ser el mínimo compatible con la eficiencia en la protección.
- ✓ No debe restringir los movimientos del trabajador.
- ✓ Debe ser durable y de ser posible el mantenimiento debe hacerse en la empresa.
- ✓ Debe ser construido de acuerdo con las normas de construcción.
- ✓ Debe tener una apariencia atractiva.

## 7.2 Plan de Operación

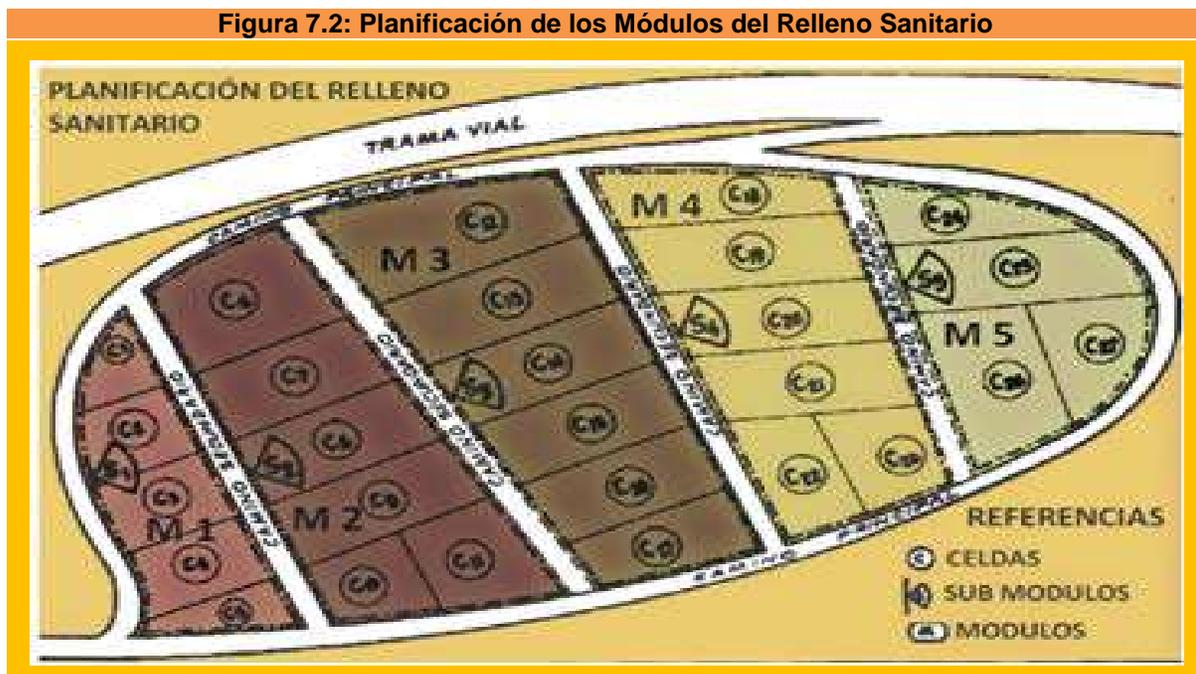
Con un plan de operación, se puede hacer más eficiente el manejo diario del relleno sanitario y se establece con claridad los papeles y responsabilidades de los involucrados.

### 7.2.1 Planificación de orden en construcción de celdas

Se debe planificar el orden adecuado en la construcción de las celdas, sean estas trincheras, plataformas para el método de área, o por el método combinado, el objetivo es optimizar el área del

sitio seleccionado para la disposición de residuos sólidos, minimizar recorridos de acarreo de material de cobertura, y construir infraestructura adecuada para la vida útil del relleno sanitario.

**Figura 7.2: Planificación de los Módulos del Relleno Sanitario**



## 7.2.2 Ingreso de los Residuos Sólidos y Registro

Se deben registrar los residuos sólidos que entran en el relleno sanitario, para cuantificar la cantidad que ingresa al relleno sanitario, esto se lo puede hacer a través de la báscula llevando un control en (Ton/día) o mediante la capacidad volumétrica de los vehículos que se utilizan para la recolección de los residuos ( $m^3/día$ ), en caso de no contar con báscula de pesaje.

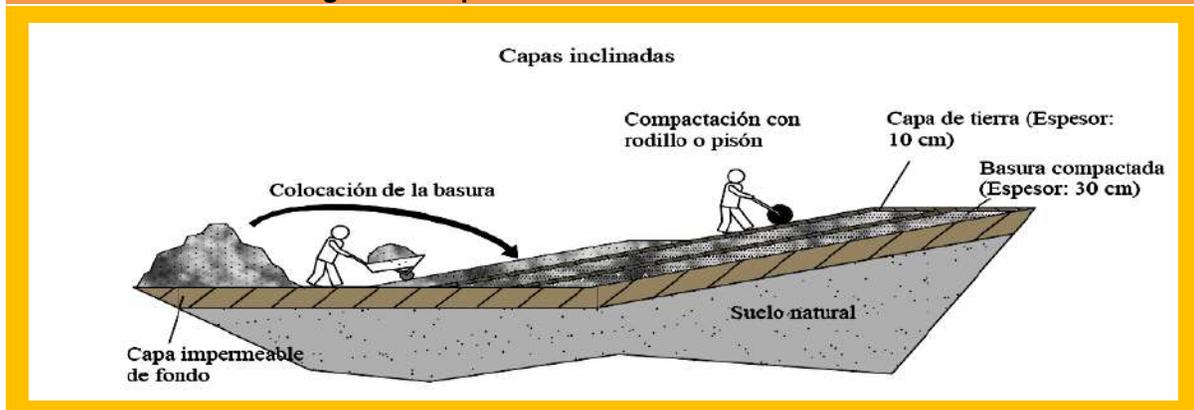
## 7.2.3 Descarga, compactación y cubierta de residuos sólidos

Se pueden aplicar diferentes técnicas de descarga de residuos sólidos. Depende mucho si se trata de un relleno sanitario manual o un relleno con compactación mecanizada. Los trabajos para obtener un relleno seguro y una prolongada vida útil no teniendo mayores impactos ambientales, se describen a continuación.

### 7.2.3.1 Para Rellenos Manuales

Los residuos se descargan lo más cerca posible al sitio donde se rellenará, por lo que, es importante informar e indicar al chofer del vehículo recolector, sobre el trabajo a realizar. Los trabajadores depositan los residuos en capas delgadas, de un espesor máximo de 30 cm. Se pueden construir capas horizontales o capas inclinadas que se apoyen en un talud natural o en las capas construidas anteriormente. Si se hace la colocación de los residuos sólidos con capas inclinadas, estas no deben ser más inclinadas que 1:3.

**Figura 7.3: Operación en Rellenos Manuales**



Fuente: Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales, Robén Eva, Loja, Ecuador, 2002

Las capas se deben construir diariamente, compactar y cubrir con una capa de unos 10-15 cm de tierra. Para la protección del relleno sanitario contra roedores, insectos y otros animales (gallinazos, perros callejeros, etc.), y para impedir la dispersión de materiales volátiles, polvo y olores es muy importante que no quede expuesto ningún residuo.

El material de cobertura se puede conseguir del sitio mismo del relleno. Si se hace el relleno manual en forma de trinchera, el material excavado sirve como cobertura diaria y también se puede utilizar como cobertura final. En caso de que se construya el relleno sanitario en el área, hay diferentes posibilidades de suministrar el material de cobertura:

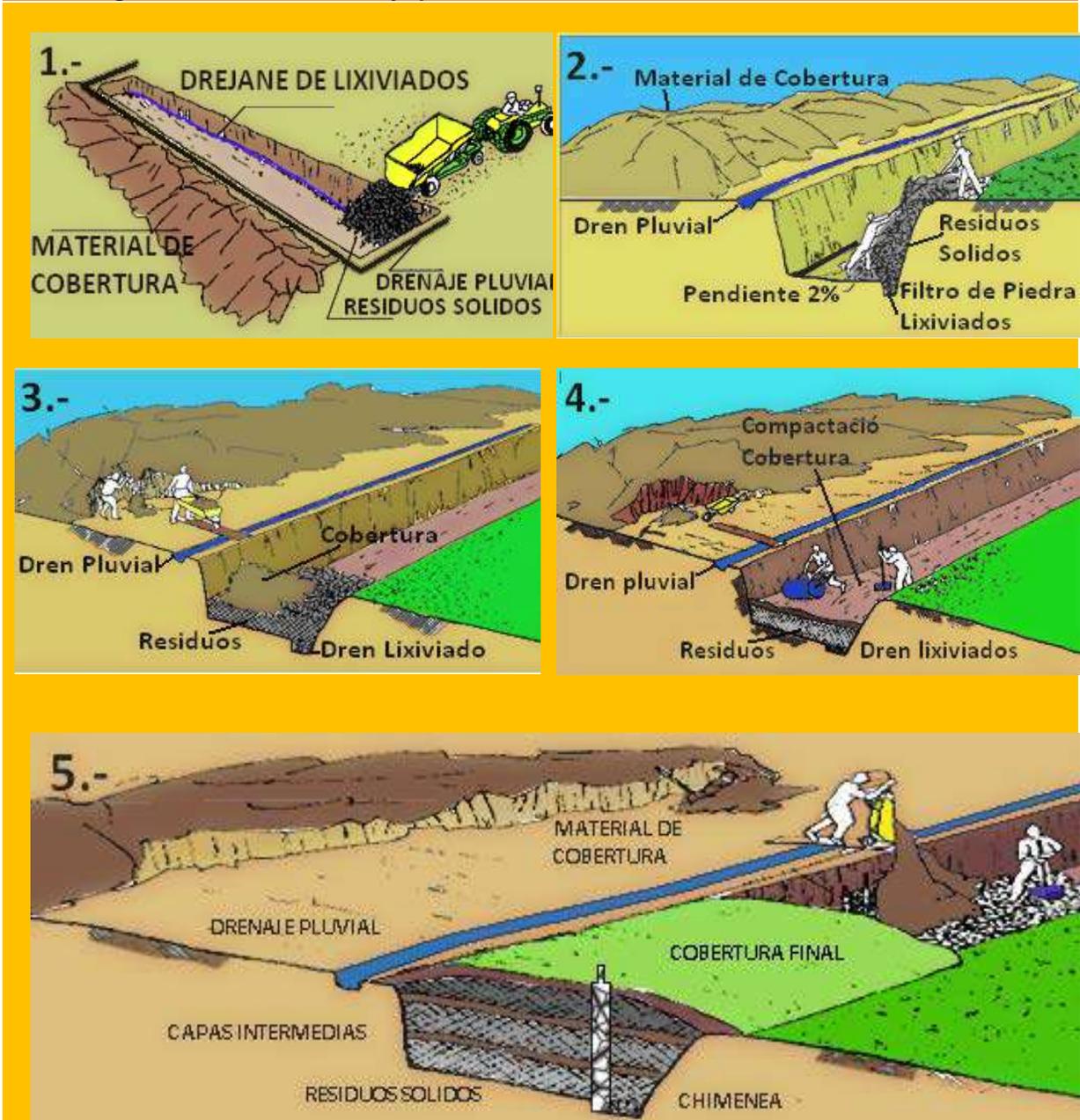
- ♻️ Si se aprovechan los residuos biodegradables produciendo humus, la fracción gruesa sobrante del proceso de cribado del compost se puede utilizar para cubrir los desechos, aunque no es la mejor alternativa porque esta fracción puede ser reincorporada en el proceso de compostaje y ser usada como estructurante.
- ♻️ Si el relleno se construye en un terreno inclinado, se puede nivelar el talud y utilizar la tierra sobrante.
- ♻️ Se puede buscar tierra de los alrededores.
- ♻️ Se puede recibir en el relleno sanitario la tierra sobrante de excavaciones dentro de la ciudad, anunciando que se recibe la tierra en el relleno sanitario.

En regiones con mucha precipitación, la excavación o el transporte diario del material de cobertura puede ser problemático, cuando la tierra se satura de humedad, pesa más y es más pegajosa que en la época seca. Por ello, se recomienda almacenar una cantidad suficiente de material de cobertura en el mismo relleno. Si es posible, se almacena esta tierra sobre una celda ya terminada. Con esto, la distancia de transporte hacia la celda actualmente operada sería mínima, y el peso de la tierra acumulada ayudaría a compactar más la celda terminada y disminuiría la generación de aguas lixiviadas.

La compactación de los residuos depositados y de la cobertura se realiza con los pisones manuales y con el rodillo manual o en lo posible con un minicargador para apoyar con el material de cobertura.

En rellenos sanitarios manuales, para la compactación de los taludes, el uso de pisones es más recomendable; para superficies horizontales se utiliza el rodillo manual, así mismo es una gran ayuda el uso de saltarín de obras civiles para realizar esta tarea de compactación aunque aumenta el costo por el uso de combustible pero la eficiencia del trabajo y rendimiento de los obreros es muy significativa.

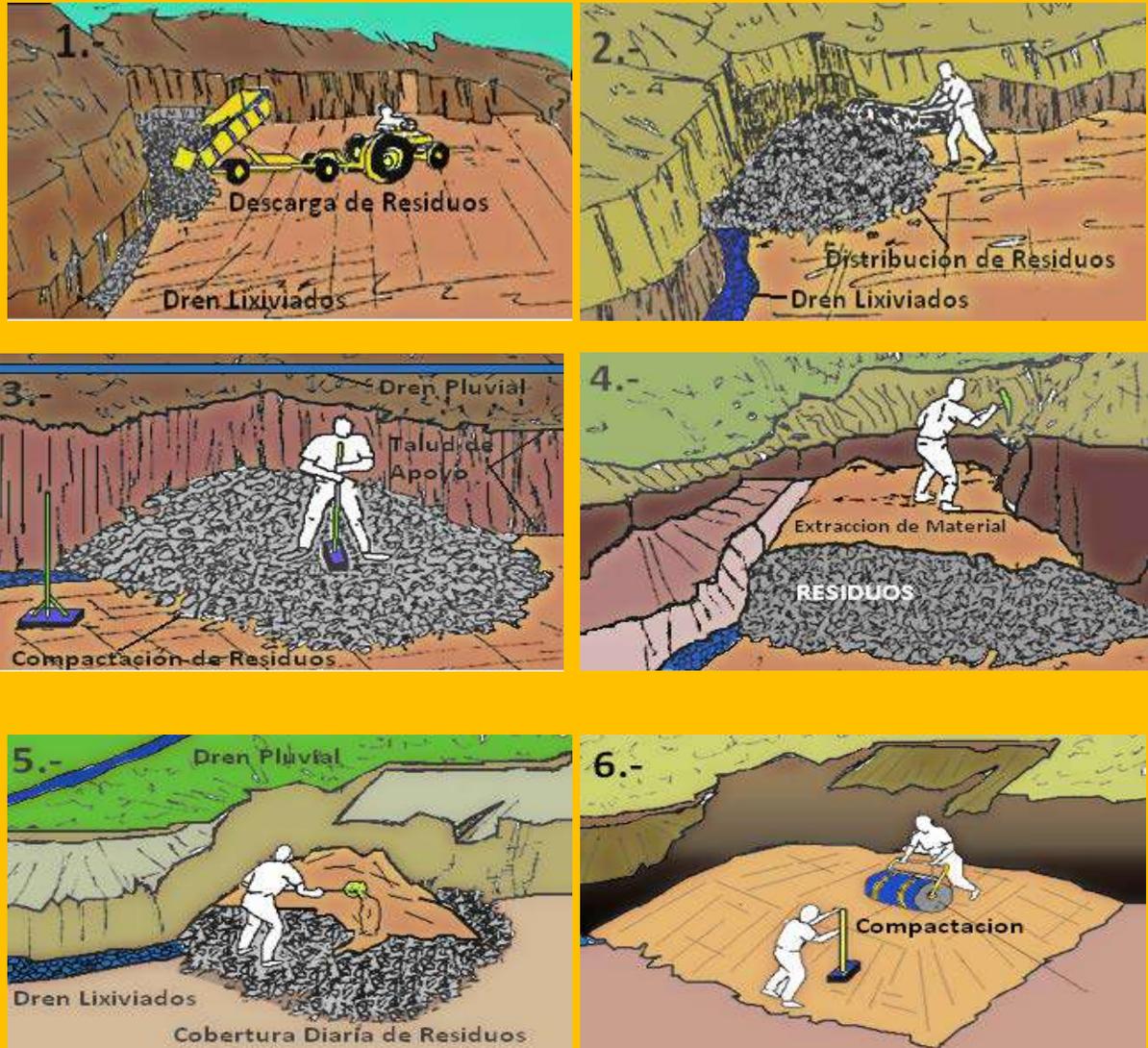
**Figura 7.4: Forma de Trabajo para Relleno Sanitario Manual Método de Trinchera**



Fuente: Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales, Jaramillo, 2002

- 1.- Descarga de los residuos sólidos en la trinchera
- 2.- Distribuir y compactar los residuos sólidos en capas de 30 cm de espesor.
- 3.- Realizar la cobertura diaria de los residuos con material arcilloso con un espesor de 10 a 15 cm.
- 4.- Compactar el material de cobertura diario.
- 5.- Construcción de chimenea y cobertura final de la celda de trabajo.

**Figura 7.5: Forma de Trabajo para Relleno Sanitario Manual Método de Área**



Fuente: Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales, Jaramillo, 2002

- 1.- Descarga de los residuos sólidos en el frente de trabajo
- 2.- Distribuir los residuos sólidos en capas de 30 cm de espesor.
- 3.- Realizar una compactación de los residuos sólidos con pisón.
- 4.- Realizar la extracción de material de cobertura de los taludes adyacentes.
- 5.- Realizar la cobertura de los residuos sólidos
- 6.- Compactación del material de cobertura diario.

### 7.2.3.2 Para Rellenos Mecanizados

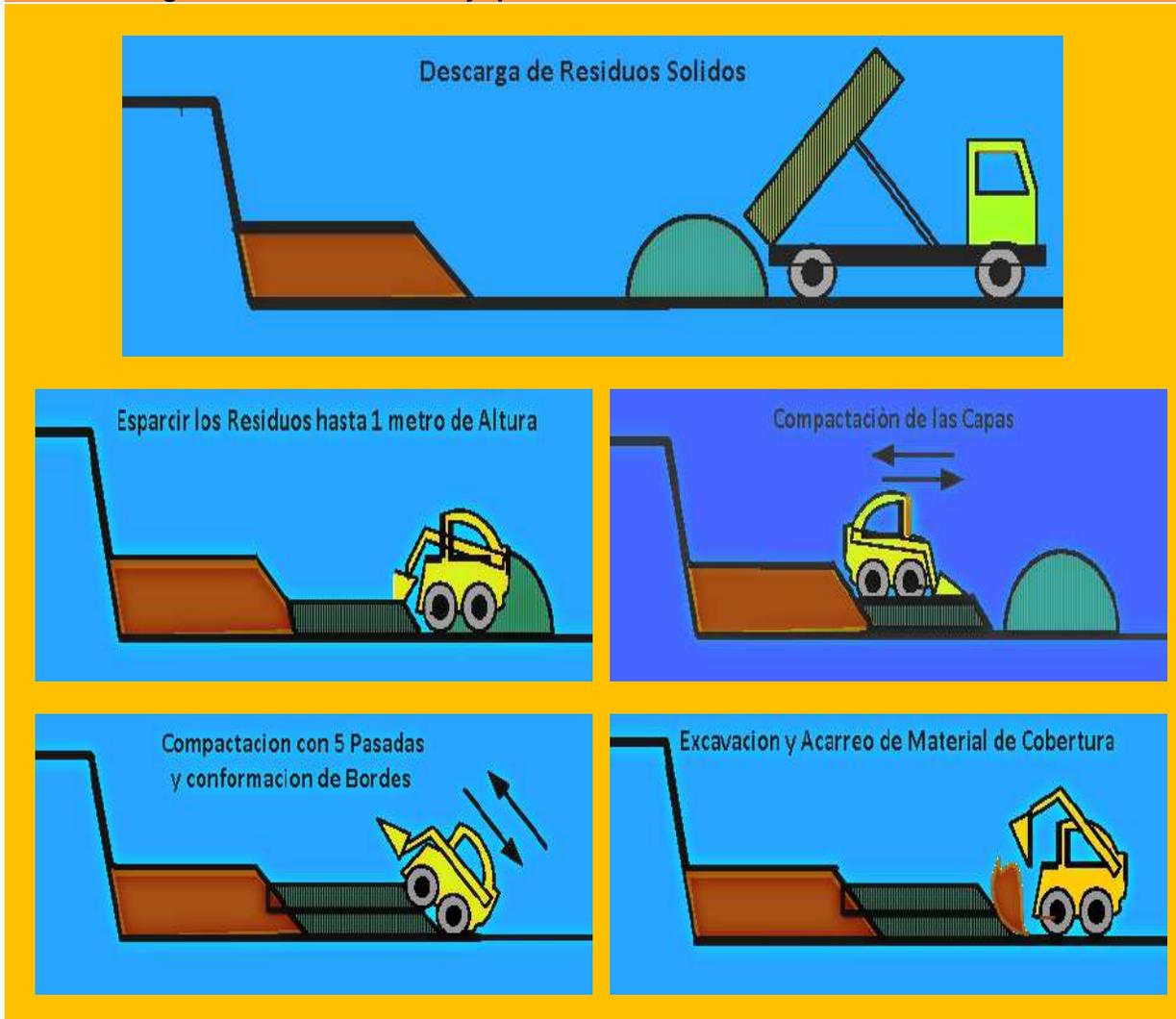
Dependiendo de la forma y topografía del terreno, se pueden aplicar diferentes métodos de descarga de residuos sólidos en rellenos sanitarios mecanizados. Es indispensable compactar los residuos sólidos de manera óptima para extender la vida útil del relleno y minimizar los impactos ambientales. Las siguientes medidas ayudan a lograr este objetivo:

- ♻️ Los residuos sólidos se deben colocar de forma homogénea. Es importante que el personal que tiene la función de indicar los lugares de descarga los organice de tal manera que los montículos de residuos descargados se distribuyan homogéneamente sobre el área de frente

de trabajo diario. Esta precaución minimiza también el trabajo y consecuentemente los costos del tractor compactador.

- ♻️ Se recomienda utilizar compactadores pesados especiales en rellenos muy grandes y utilizar un segundo tractor liviano para trabajos auxiliares y realizar capas delgadas de entre 0.5 a 1 m de forma de obtener buenos resultados con la compactación.
- ♻️ El número de las pasadas que hace el tractor sobre los desechos influye en la compactación, La bibliografía establece que realizar más de 8 pasadas no contribuye significativamente en el grado de compactación, por consiguiente de forma de no encarecer los costos por maquinaria y maximizar el uso de esta se recomienda realizar únicamente 8 pasadas para la compactación de residuos sólidos.
- ♻️ Se debe cubrir los residuos sólidos descargada cada día al fin de la jornada con una capa de tierra. La cantidad del material usado para la cobertura debe ser en una relación de 1 (material de cobertura) a 3 (residuos sólidos). Si se depositan 50 m<sup>3</sup> de residuos, se debe utilizar entre 13 - 15 m<sup>3</sup> de tierra para la cobertura.

**Figura 7.6: Forma de Trabajo para Rellenos mecanizados en la celda diaria**





Fuente: Guía práctica para la operación de celdas diarias en rellenos sanitarios pequeños y medianos, PROARCA/SIGMA, Melendez Carlos, 2004

## 7.2.4 Conclusión de una celda o módulo de trabajo

Cuando se cierra el relleno sanitario o un módulo del relleno, hay que construir una capa final para poder restaurar el terreno, se debe construir una cubierta final más elaborada que las cubiertas diarias o intermedias.

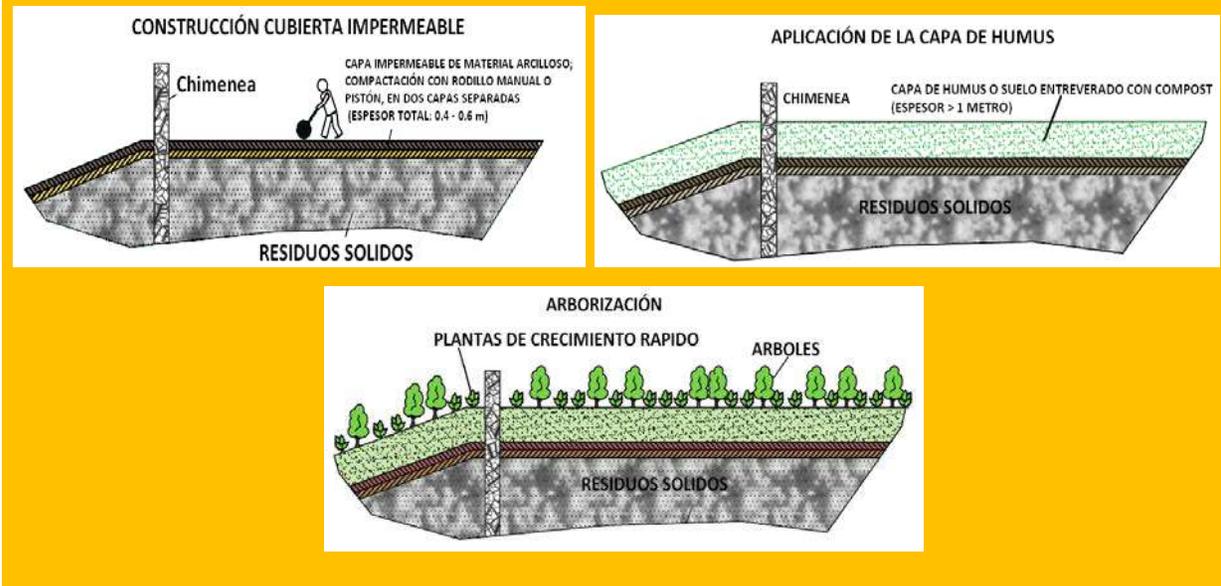
El propósito de la cubierta final de un sitio de disposición final es aislar a los residuos más superficiales del ambiente, para minimizar la migración de líquidos en las celdas y controlar el venteo del biogás generado. Un sistema de cobertura final debe ser construido tomando en cuenta las condiciones descritas en la NB-760, para que cumpla con las funciones anteriores, aunando a un mínimo mantenimiento del drenaje adecuado, reduciendo la erosión y asentamientos, con una permeabilidad muy baja.

En la medida de lo posible, el material de cobertura será extraído del mismo predio o de sectores aledaños al sitio de disposición final.

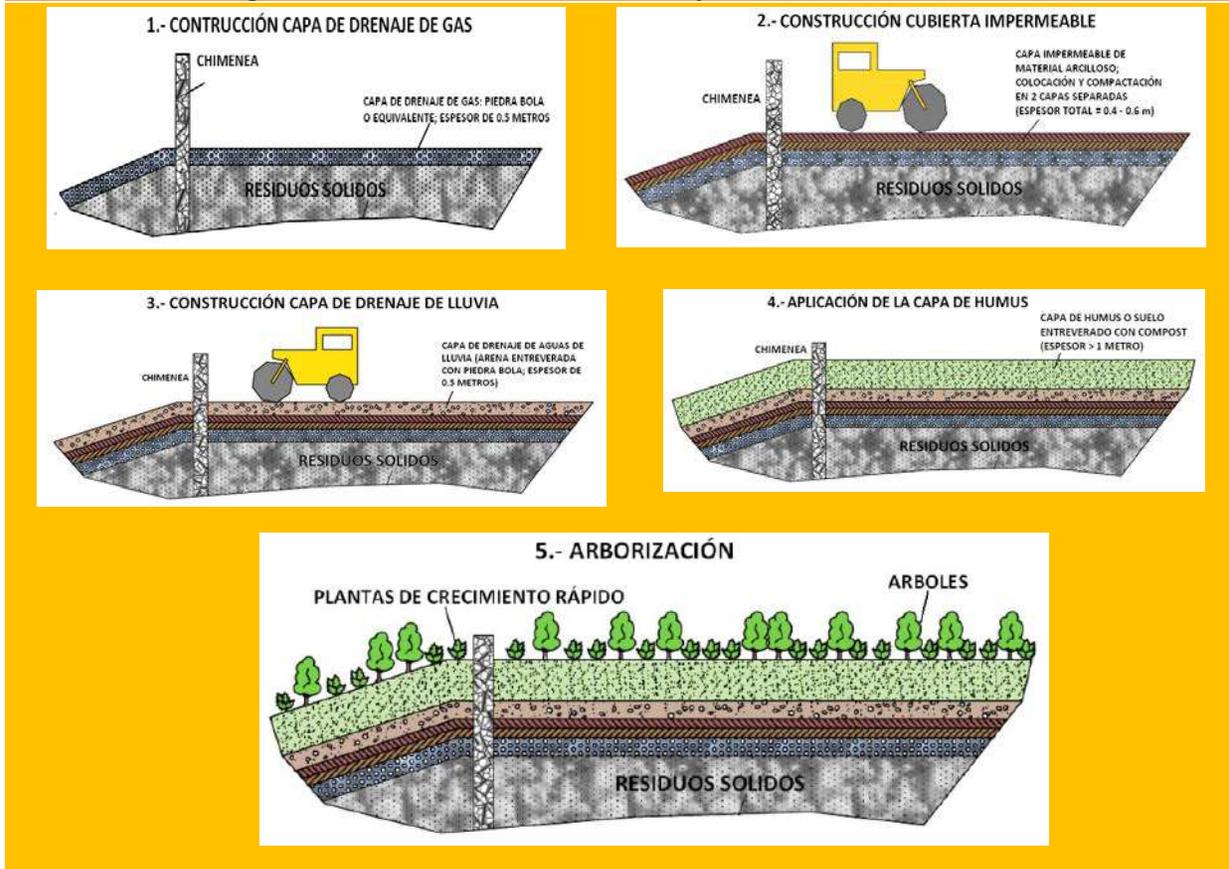
Se recomienda construir una capa final de 0.40 - 0.60 m en dos etapas, cada una de 0.20 - 0.30 m de espesor, con un intervalo de aproximadamente un mes para tratar de cubrir los asentamientos que se produzcan en la primera capa. Algunas recomendaciones pasan por:

- ❧ Las condiciones de compactación e impermeabilidad de la capa impermeable, deben lograrse con una masa homogénea de permeabilidad de  $10^{-6}$  cm/s o menor y un alto grado compactación.
- ❧ En caso de no disponer de material natural con la suficiente impermeabilidad, se pueden usar materiales sintéticos como geomembrana de PEAD de 1 - 1,5 mm de grosor (mejor 1,5 mm para evitar roturas).
- ❧ Entre los residuos y la geomembrana es importante incluir una capa que permita el drenaje de los biogases. Esto es porque cuando ponemos la cobertura final impermeable el gas queda atrapado y se generan bolsas en el interior del relleno sanitario que tienden a subir arriba. La capa drenante de gases, puede ser de gravas.
- ❧ Para canalizar posibles aguas de infiltración, entre la capa vegetal y la capa de impermeabilización, se debe colocar una capa drenante, esta puede ser de grava o de material sintético como un geodren.
- ❧ En caso de usar gravas para la capa drenante de agua y geomembrana como capa impermeabilizante, es conveniente usar un geotéxtil no tejido de  $200\text{gr/m}^2$  entre la geomembrana y las gravas, para la protección de la geomembrana y un geotéxtil filtrante entre la capa vegetal y la capa de gravas, para evitar la colmatación de estas gravas. Si se usa geodrán para drenar no es necesario colocar geotéxtil.

**Figura 7.7: Cierre de Modulo de Trabajo en Relleno Manual**



**Figura 7.8: Cierre de Modulo de Trabajo en Relleno Mecanizado**



Fuente: Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales, Robén Eva, Loja, Ecuador, 2002

### 7.3 Compactación de los residuos<sup>26</sup>

Por lo general, seleccionar un nuevo sitio para la disposición final de los residuos sólidos y obtener la aprobación del mismo por parte de las comunidades aledañas es una tarea compleja, principalmente por el efecto NIMBY (Not in back yard, No en mi patio trasero), por lo que debe aprovecharse al máximo los espacios logrados, mediante la aplicación de mecanismos técnicos como por ejemplo la compactación de manera de prolongar la vida del relleno sanitario.

Mejor compactación significa compactar más residuos en menos espacio. Estos son algunos de los beneficios:

- ♻ Se prolonga la vida del sitio
- ♻ Se reduce el asentamiento
- ♻ Se reducen los espacios vacíos
- ♻ Se reduce la residuos sólidos transportada por el viento
- ♻ Se combaten los insectos y roedores
- ♻ Se reduce la posibilidad del deslavado de desperdicios o que queden expuestos durante una lluvia
- ♻ Se reduce la cantidad de cobertura diaria necesaria, reduciendo por lo tanto el trabajo de excavación con máquina
- ♻ Se reduce la percolación de líquidos y la migración de metano
- ♻ Se suministra una superficie de desplazamiento más sólida para los camiones de residuos sólidos — reduciendo el mantenimiento y las reparaciones.

#### Ejemplo de la mayor compactación sobre la vida potencial del relleno

Capacidad de residuos del relleno: 1.529.200 m<sup>3</sup>  
 Generación anual: 104.000 ton/año (285 ton/día)

Compactación	Vida del relleno	Ganancia
1.000 lb/yd <sup>3</sup> 593 kg/m <sup>3</sup>	9,6 años	0
1.200 lb/yd <sup>3</sup> 712 Kg/m <sup>3</sup>	11,5 años	1,9 años
1.600 lb/yd <sup>3</sup> 949 Kg/m <sup>3</sup>	15,3	5,7 años
1.800 lb/yd <sup>3</sup> 1.068 Kg/m <sup>3</sup>	17,2	7,6 años

Fuente: Manual de Eliminación de Residuos Caterpillar, 2001

En este ejemplo, cada aumento de 91 kilogramos (200 libras) en densidad (20%) resulta en 1,9 año adicional de vida del relleno.

Un método para determinar el valor del aumento de compactación es multiplicando el tonelaje aumentado del relleno (o metros cúbicos) por el costo por tonelada de disposición final.

Un aumento de 91 kg/m o 200 lb/yd (20%) en densidad resulta en 1,9 año de vida más larga del relleno. Al mismo volumen anual, esto significa 197.600 toneladas adicionales de residuos (1,9 x 104.000 = 197.600).

Si el costo de descarga por tonelada fuera de \$us.-30, los ingresos adicionales en este relleno serían de más de 5,9 millones de dólares (197.600 x \$us.-30.00 = \$us.-5.928.000).

<sup>26</sup> Manual de Eliminación de Residuos, Caterpillar, 2001

### 7.3.1 Peso volumétrico

La densidad o peso volumétrico se define como: el volumen necesario para acomodar una determinada cantidad de residuos sólidos de acuerdo a su peso.

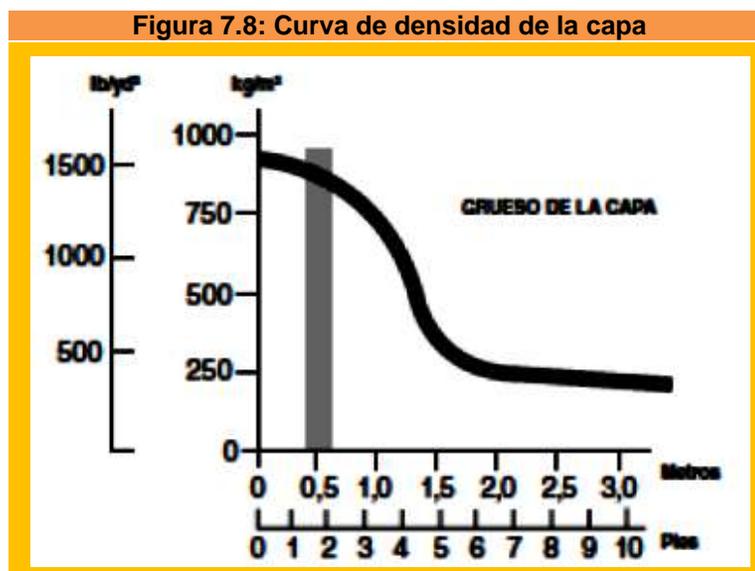
Cuadro 7.4: Variación de pesos volumétricos	
Etapa del proceso	Peso Volumétrico promedio (Kg./m <sup>3</sup> )
En la fuente residuos domésticos	180 a 200
En vehículo recolector no convencional	200 a 250
En vehículo recolector con compactación	400 a 450
En tracto camión	450
En sitio sin control	200
En relleno sanitario manual residuo recién compactado	400 a 500
En relleno sanitario, compactado con tractor tipo D-X	650 a 750
En relleno sanitario con tractor especial para compactar residuos sólidos	850 a 900

Fuente: Manual de Eliminación de Residuos Caterpillar, 2001

### 7.3.2 Factores de compactación

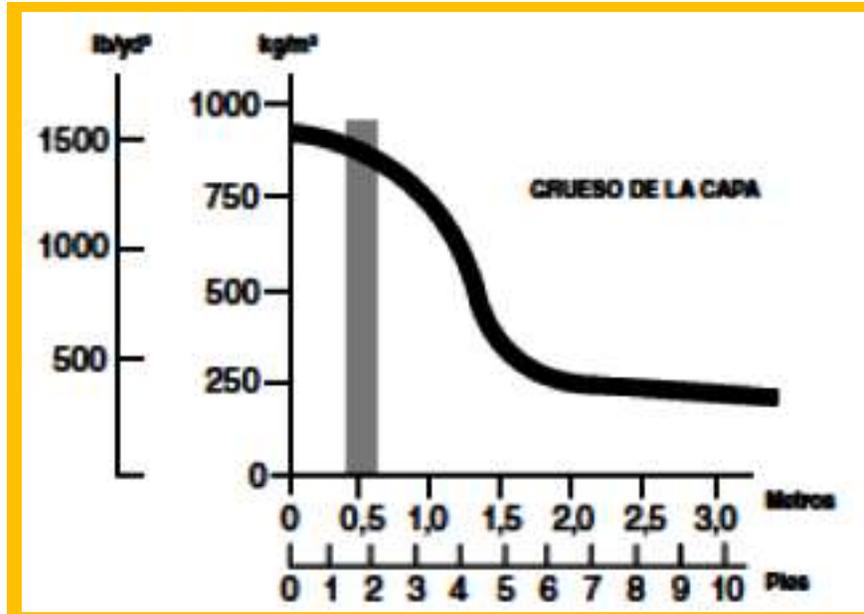
#### ♻️ Espesor de la capa

El espesor de la capa de residuos dispuestos es el factor más importante. Para obtener una mayor densidad, se deben esparcir los residuos en capas de no más de 60 centímetros de grosor y compactarse. Cuanto más gruesa la capa, tanto menor la densidad a la que la puede compactar la máquina.



Fuente: Manual de Manejo de Desechos. Caterpillar. 1991.

**Figura 7.9: Curva de densidad de la capa**

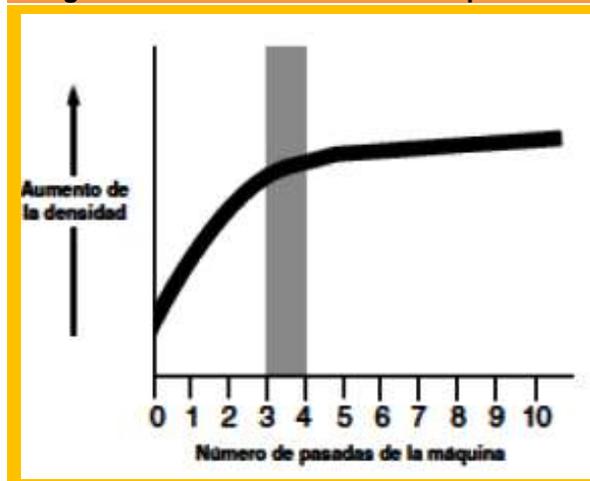


Fuente: Manual de Manejo de Desechos. Caterpillar. 1991.

### 🔄 Número de pasadas

El número de pasadas que realiza una máquina compactadora sobre los residuos sólidos también afecta la densidad. Se define una pasada como una máquina que se desplaza sobre los residuos sólidos una vez en un sentido. Cualquiera que sea la máquina, es recomendable efectuar de tres a cuatro pasadas de máquina para lograr mejores resultados. Más de cuatro pasadas no logran densidad adicional suficiente para hacer que resulte económico, como lo indica la gráfica de abajo.

**Figura 7.10: Curva del número de pasadas**



Fuente: Manual de Manejo de Desechos. Caterpillar. 1991.

Las pendientes se deben mantener a un mínimo — pendientes de 4:1 o menos.

Una superficie horizontal permite la mejor compactación. Sin embargo, empujar o trabajar con los residuos sólidos cuesta arriba tiene ciertas ventajas:

- ✓ La superficie de trabajo vertical cubre menos superficie que una cara de trabajo horizontal — reduciendo así los problemas de residuos sólidos y la cantidad de material de cobertura necesaria.
- ✓ Cuando una máquina trabaja cuesta arriba, en lugar de hacerlo cuesta abajo, es más fácil lograr un grueso de la capa más uniforme sobre toda la superficie puesto que el material de residuos no rodará delante de la hoja para apilarse al pie de la pendiente.
- ✓ Habiendo observado estas situaciones, se debe recalcar que en casi todos los casos, cuanto más plana la superficie, tanto mejor.

### Contenido de humedad

El contenido de humedad también afecta considerablemente la densidad de compactación. El agua ablanda materiales como papel y cartón y permite una consolidación más sólida.

Las pruebas de campo indican que el contenido de humedad varía del 10 al 80%, dependiendo si la estación es lluviosa o seca. Pero el mejor contenido de humedad para una máxima compactación es alrededor del 50%. Una mínima cantidad de humedad puede aumentar la compactación de los residuos sólidos en un 10%. Sin embargo, mientras mayor es el contenido de humedad aumenta la probabilidad de formación de fluido de percolación, por lo que es recomendable controlar dicho factor dependiendo la estación climatológica.

## 7.4 Selección del Equipo y Vehículos requeridos para la Operación del Relleno Sanitario<sup>27</sup>

La construcción y operación del relleno sanitario requiere de equipo especializado cuya selección se realiza tomando en cuenta el método de operación y las condiciones de trabajo para el adecuado movimiento y compactación de los residuos sólidos y material de cubierta. Cualquier relleno sanitario con operación mecánica, necesita máquinas para:

- ✓ Preparación de terreno, incluyendo desmonte y despalme.
- ✓ Compactación y manejo de residuos.
- ✓ Excavación, transporte y aplicación de cubierta diaria.
- ✓ Esparcimiento y compactación de la cubierta final.
- ✓ Trabajos generales y de limpieza.

Adicionalmente, hay tomar en cuenta también:

- ✓ Tonelaje y tipo de residuos a disponer y su proyección.
- ✓ Cantidad y tipo de material de cobertura.
- ✓ Distancia de acarreo del material de cobertura.
- ✓ Método de operación del relleno.
- ✓ Condiciones del tiempo.
- ✓ Necesidades de compactación.
- ✓ Tareas complementarias.
- ✓ Recursos económicos.

Lo anterior implica que es esencial conocer la amplia variedad de diseños y de capacidades de rendimiento de las máquinas especializadas en rellenos sanitarios. La versatilidad es otro factor importante en la selección de maquinaria. Mientras más trabajos la máquina pueda hacer, menos necesidad hay de adquirir otros equipos.

<sup>27</sup> Manual de Manejo de Desechos. Caterpillar. 1991.

**Cuadro 7.5: Selección de Equipos Según el Tonelaje Diario de Residuos**

Población	Toneladas	Equipo
0-20000	0-50 0-45*	D3C, 933C
20.000-60.000	50-150 45-136*	D6R ó 953C ó 816F
60.000-100.000	150-250 136-226*	D6R ó 953C y 816F
100.000-140.000	250-350 226-317*	D6R ó D7R ó 963C y 816F
140.000-200.000	350-500 317-453*	D6R ó D7R ó 963C y 816F u 826G
200.000-300.000	500-750 453-680*	D8R y 826G u 836G
300.000 y mas	750 y mas 680 y mas*	D9R y D10R u 836G/variedad de equipos de apoyo

\* Toneladas métricas

Fuente: Manual de Manejo de Desechos. Caterpillar. 1991.

### Guías de Distancia

La distancia es un factor importante para seleccionar una máquina que mueva y manipule material de cobertura. A continuación, se dan unos ejemplos:

**Cuadro 7.6: Distancia de Recorrido Promedio de Equipos Pesado**

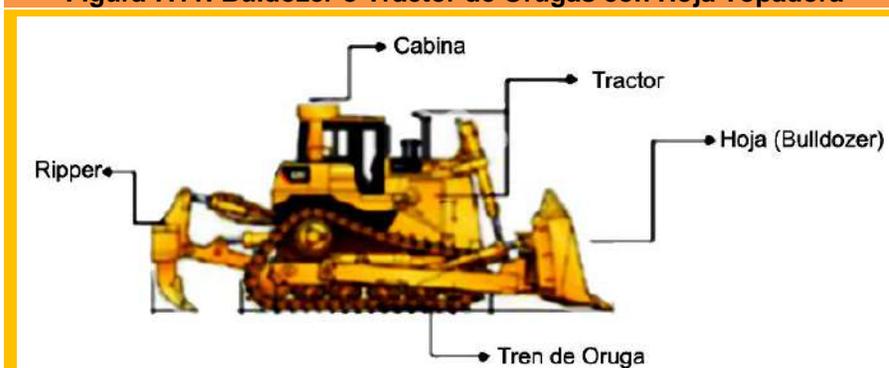
Equipo	Distancia
Tractor de cadenas	0-91,4 m (0-300 pies)
Cargador de cadenas	0-152,4 m (0-500 pies)
Compactador	0,61 m (0-200 pies)
Traílla remolcada	183-305 m (600-1000 pies)
Moto traílla de ruedas	> 183 m (> 600 pies)
Camión de obras	> 305 m (> 1000 pies)
Camión articulado	> 305 m (> 1000 pies)

Fuente: Manual de Manejo de Desechos. Caterpillar. 1991.

### 7.4.1 Buldozer o Tractor Oruga

Su función principal es distribuir y compactar los residuos, así como realizar la preparación del sitio, suministrar la cubierta diaria y final y trabajos generales de movimiento de tierras.

**Figura 7.11: Buldózer o Tractor de Orugas con Hoja Topadora**



Fuente: Manual de Manejo de Desechos. Caterpillar. 1991.

Los bulldozers están equipados con orugas metálicas de anchos variables especificados, tales como 457 mm, 508 mm, 559 mm y 610 mm. Las orugas deben ser lo suficientemente altas como para

permitir una buena reducción de tamaño de los residuos y evitar posibles deslizamientos. La presión descargada sobre los residuos se obtiene distribuyendo el peso de la máquina sobre la superficie de contacto.

El tractor de cadenas logra densidades de compactación de 475 a 593 kg/m<sup>3</sup> y frecuentemente puede trabajar en pendientes empinadas que resultan demasiado difíciles para otro tipo de máquinas. Los tractores de cadenas pueden mover económicamente material a distancias de hasta 90 metros.

Cuadro 7.7: Descarga de presión a los residuos			
Potencia (HP)	Peso (Kg)	Área de contacto con los Residuos (m <sup>2</sup> )	Presión (kg/cm <sup>2</sup> )
140	11,750	2.16	0.54
200	16,100	2.76	0.53
300	24,770	3.19	0.78

Fuente: Manual de Manejo de Desechos. Caterpillar. 1991.

El grado de compactación de los residuos depende de la presión ejercida. Como se mencionó anteriormente, a menor espesor de capa de residuos, mayor compactación. Las máquinas con orugas no son muy eficientes en la compactación de los residuos sólidos, debido a su baja presión sobre el suelo.

Para obtener una máxima eficiencia de las máquinas con orugas, es muy importante que estén equipadas con hojas topadoras adecuadas. La densidad de los residuos sólidos es aproximadamente tres veces menor que la del suelo; por lo tanto es posible incrementar la capacidad de la hoja. La capacidad de la hoja se puede aumentar mediante el incremento de su altura, utilizando una malla de acero. Ésta evita la interferencia con la visibilidad del operador. Las dimensiones de la hoja varían con cada modelo. Por ejemplo, una máquina típica de 140 HP, sobre superficies planas, tiene un rendimiento de 50 toneladas de residuos sólidos por hora. Ahora bien, sobre superficies inclinadas el rendimiento de éste equipo disminuye a 30 toneladas por hora, en una pendiente del 30 %.

Cuadro 7.8: Rendimiento de Bulldozer tractores de cadenas							
Modelo	DIOR WHA	MR WHA	D8R WHA	D7R WHA	MR WHA	MM WHA	MM WHA
Al volante	570 HP (425 kW)	405 HP (302 kW)	305 HP (228 kW)	230 HP (172 kW)	165 HP (123 kW)	140 HP (104 kW)	110 HP (82 kW)
Peso en orden de trabajo	65.764 kg (144.986 lb)	47.913 kg (105.6301 lb)	37.630 kg (82.880 lb)	27.920 kg (61.500 lb)	20.600 kg (45.370 lb)	15.060 kg (33 200 lb)	13.175 kg (29.050 lb)
Motor	3412 E	3408 E	3406 C	3306	3306	3116	3116
Ancho de zapata estándar (WHA)	610 mm (24")	610 mm (24")	560 mm (22")	560 mm (22")	560 mm (22")	560 mm (22")	560 mm (22")
Despejo s/ suelo	615 mm (24,2")	584 mm (23")	584 mm (23")	414 mm (16.3")	383 mm (15.1")	424 mm (16.7")	386 mm (15.2")
Capacidad Hoja IT	48,8 m <sup>3</sup> (63.9yd <sup>3</sup> )	33.5 m <sup>3</sup> (43.8 yd <sup>3</sup> )	24.7 m <sup>3</sup> (32.4 yd <sup>3</sup> )	16.8 m <sup>3</sup> (22 yd <sup>3</sup> )	11.2 m <sup>3</sup> (14.3 yd <sup>3</sup> )	4.28 m <sup>3</sup> (5.6 yd <sup>3</sup> )	2.9 m <sup>3</sup> (3.4 yd <sup>3</sup> )

Fuente: Manual de Manejo de Desechos. Caterpillar. 1991.

Nota: WHA: Waste Handling Arrangement (Versión para manejo de residuos)

## 7.4.2 Compactador con Ruedas Metálicas

Su función principal consiste en el extendido y compactado de los residuos. Los compactadores están equipados con máquinas diesel tanto turbo como estándar. Las ruedas metálicas tienen generalmente dientes en forma de “V” invertida y alternados que le permiten concentrar el peso sobre una superficie de contacto más pequeña (comparada con una máquina de orugas) y ejerciendo una mayor presión sobre los residuos sólidos. La Tabla 7.11, presenta algunos valores de presiones promedio para dos distintas potencias de ésta máquina.



Fuente: Empresa Municipal Aseo El Alto

Para maximizar la densidad de compactación, un compactador debe operar en superficies planas donde pueda aplicar mayor peso sobre los residuos sólidos.

Para sitios que superan las 1.000 Ton/día, es recomendable emplear una maquina 836, que es capaz de lograr una compactación 800 – 1.200 kg/m<sup>3</sup>. Para sitios que reciben hasta 800 Ton/día, es recomendable emplear una maquina 826 G, cuya capacidad de compactación varía entre 600 - 950 kg/m<sup>3</sup>. Para sitios que manejan menos de 500 Ton/día, es recomendable emplear el 816F, cuya compactación varía entre 534 - 712 kg/m<sup>3</sup>.

Cuadro 7.9: Descarga de presión a los residuos			
Tipo	Potencia (HP)	Peso (Kg)	Compactación (kg/m <sup>3</sup> )
836	481	53.682	800 - 1200
826 G	315	34.839	600 – 950
816 F	220	22.732	534 - 712

Fuente: Manual de Manejo de Desechos. Caterpillar. 1991.

Los compactadores son más versátiles y rápidos que los buldózers. Un modelo de 220 HP tendría una productividad de aproximadamente 75 toneladas por hora en superficies planas. La productividad disminuye alrededor de 50 toneladas por hora para superficies de 30% de pendiente.

La distancia de empuje de los residuos sólidos, puede llegar hasta 60 metros, esparciendo y efectuando de tres a cuatro pasadas para compactarla.

Los compactadores con ruedas de acero están equipados con hojas controladas por un sistema hidráulica. La hoja tiene una rejilla metálica adicional para aumentar su capacidad. Las dimensiones de la hoja son las siguientes:

- ✓ Ancho: 3.04 m
- ✓ Altura (con rejilla): 1.88 m

### 7.4.3 Cargador de Ruedas

La cargadora frontal de neumáticos es un equipo tractor, que tiene un cucharón de gran tamaño en su extremo frontal. Su función principal es la de excavar suelo suave (por ejemplo, suelos que presentan poca resistencia), cargar el material excavado a los camiones y pick-ups o para transportar ese material a distancias no mayores a 50 ó 60 m, para una eficiencia óptima.



Fuente: Manual de Manejo de Desechos. Caterpillar. 1991.

Los cargadores de neumáticos generalmente están equipados con máquinas diesel y dirección en las cuatro ruedas. El eje frontal es fijo y el trasero puede oscilar. Los modelos varían en potencia, en un intervalo entre los 65 HP y los 375 HP. La capacidad del cucharón varía de 0.8 m<sup>3</sup> a 6 m<sup>3</sup>. Los modelos más comúnmente utilizados son de alrededor de 100 HP a 150 HP. En el cuadro 7.11, se presentan algunas características de estos modelos.

Potencia (HP)	Peso (Kg)	Capacidad de Cucharón (m <sup>3</sup> )
100	9,280	1.34-1.72
130	11,550	1.72-2.68

Fuente: Manual de Manejo de Desechos. Caterpillar. 1991.

Sobre suelo suave, una máquina de 130 HP con una capacidad de cucharón para 1.91 m<sup>3</sup> será capaz de excavar y cargar un camión de volteo a una velocidad de alrededor de 160 m<sup>3</sup>/hora de trabajo. En suelo duro, la producción disminuye y esta máquina probablemente necesitará ser reemplazada por una más adecuada para realizar la excavación. Los cargadores de neumáticos también son aptos para realizar eficientemente trabajos relacionados con las operaciones del relleno sanitario.

#### 7.4.4 Cargador de Orugas

El cargador de cadenas es la máquina polivalente para rellenos grandes o pequeños. Puede trabajar solo en una gran variedad de trabajos, o puede hacer de máquina de apoyo, complementando otras máquinas en aplicaciones específicas. Puede: excavar, acarrear, apilar, cargar, cubrir, separar, desgarrar, explanar, compactar y nivelar

Los cargadores de cadenas pueden lograr excelente compactación, debido a su doble garra y zapata. La cadena de una garra optativa es más agresiva, y proporciona más tracción y acción de corte.

Estas máquinas pueden desarrollar funciones similares a las de los cargadores de neumáticos. Los cargadores de orugas también son recomendables para excavar suelo macizo o duro. Su distancia óptima para transporte de materiales no debe exceder de los 30 m. En casos de emergencia, los cargadores de orugas pueden utilizarse para el manejo de residuos sólidos (extendido y compactación). También pueden ser utilizados para conformar y nivelar la cubierta de las celdas.

Los cargadores de orugas están equipados con máquinas diesel, con intervalos de potencia entre los 65 HP y los 275 HP. En la tabla 2.5, se presentan algunos valores típicos de estos equipos.

Potencia (HP)	Peso (Kg)	Área de contacto con los residuos (m <sup>2</sup> )	Capacidad de Cucharón (m <sup>3</sup> )
95	12,340	1.54	1.34
130	13,700	1.79	1.34-1.74
190	21,300	2.48	1.90-2.48

Fuente: Manual de Manejo de Desechos. Caterpillar. 1991.

El cucharón de este tipo de cargadores, se opera fácil y rápidamente mediante un mecanismo hidráulico. Se obtiene una mejor eficiencia y flexibilidad en este equipo, cuando cuenta con un cucharón multiusos. Este tipo de cucharón se adapta a diferentes operaciones conforme a la posición en la que se opera.

El cucharón tiene una sección estacionaria y otra móvil. El movimiento puede ser controlado por el operador con el mismo sistema de control. El cucharón puede actuar como; cargador, empujador, excavadora o dragadora. La versatilidad de este tipo de equipos se requiere en el relleno sanitario especialmente cuando la disponibilidad de equipo es limitada.

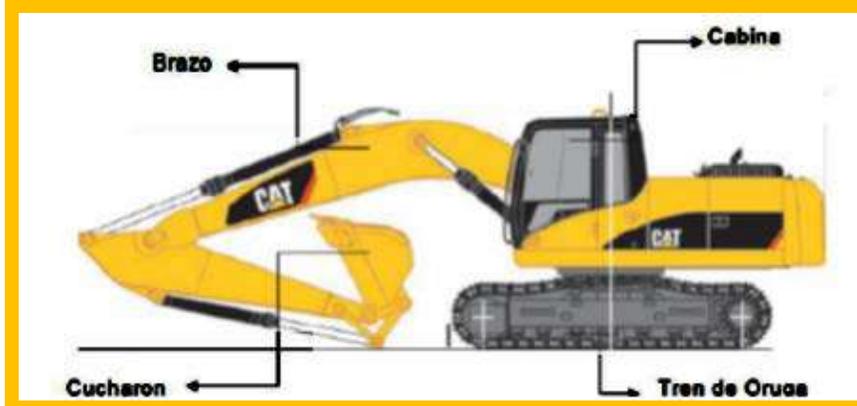
#### 7.4.5 Excavador de Orugas

Se trata de un tipo particular de máquinas autopropulsada con una superestructura capaz de efectuar una rotación de 360°, cuya función principal consiste en excavar el suelo y cargar vehículos de transporte, así como para aplicar la cobertura diaria o primaria de los residuos sólidos (en el método de Trinchera). Este equipo también puede ser utilizado bajo ciertas premisas en el movimiento de tierras. La excavadora está equipada con una máquina diesel y un sistema hidráulico para el control de los brazos de carga y del cucharón.

El tiempo del ciclo de excavación depende del tamaño del equipo y de las condiciones del sitio. Así, cuando la excavación es más difícil o la trinchera más profunda, el procedimiento de excavación será lento. La literatura comercial disponible en el mercado de los diferentes fabricantes indica el cálculo o la estimación del tiempo para el ciclo, de acuerdo con el modelo de equipo y las condiciones particulares de cada sitio (tipo de suelo y profundidad de excavación).

La profundidad de excavación (medida desde el nivel del suelo) depende del alcance de los brazos de carga. En el cuadro 7.12 se presentan algunos valores típicos de estos equipos.

**Figura 7.13: Excavador de Orugas**



Fuente: Manual de Manejo de Desechos. Caterpillar. 1991.

**Cuadro 7.12: Características de la excavadora de orugas**

Potencia (HP)	Peso (Kg)	Longitud del Brazo de Carga (m)	Capacidad de Cucharón (m <sup>3</sup> )	Profundidad Máxima de Excavación (m)
135	22,680	2.44	0.75	6.4
195	34,020	2.90	1.18	7.3
325	56,200	3.20	1.94	8.5

Fuente: Manual de Manejo de Desechos. Caterpillar. 1991.

#### 7.4.6 Minicargador

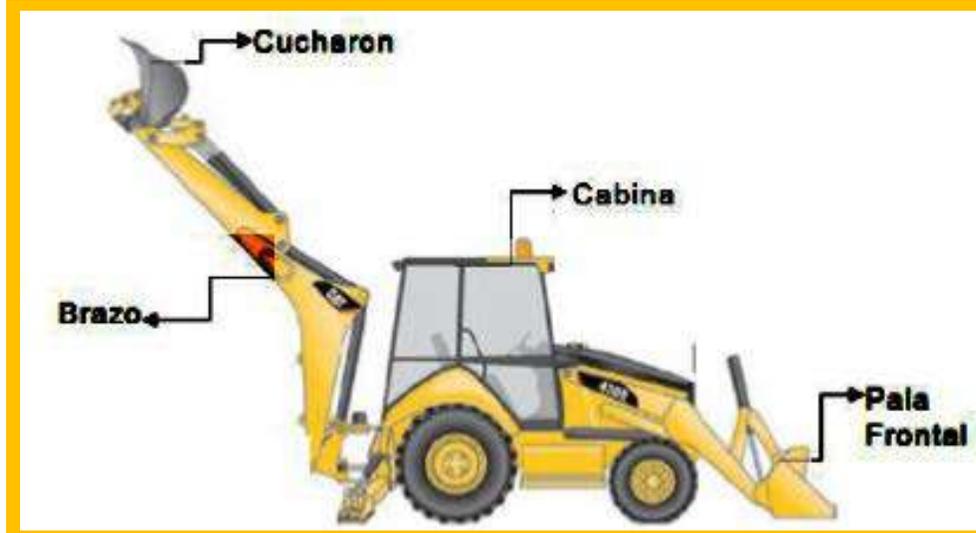
El minicargador puede suministrar flexibilidad y potencia necesarias para la mayoría de los sitios de disposición final principalmente para municipios que generan menos de 20 Ton/día. Su empleo radica en el traslado de material de cobertura, empuje de residuos y conformación de celdas.

#### 7.4.7 Retroexcavador

La Retroexcavadora es en realidad tres piezas de equipo en una, y la diversidad de la herramienta permite en la obra diferentes tareas que deben completarse con relativa facilidad.

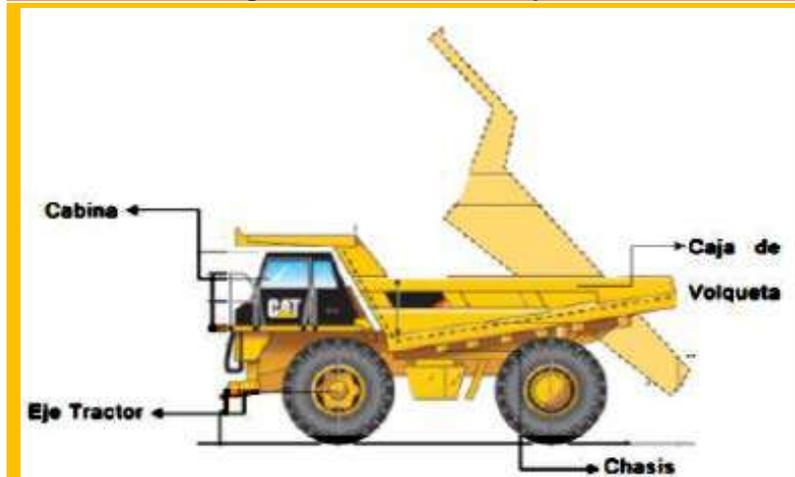
El tractor es la principal parte de la retroexcavadora y permite a los usuarios trasladarse con facilidad sobre diferentes tipos de terrenos. La retroexcavadora (cucharón) y el cargador se adjuntan al tractor y agregan elementos en términos de utilidad. El cargador se puede utilizar para limpiar material de obra y para el movimiento de tierra de un lugar a otro.

Figura 7.14: Retroexcavador



Fuente: Manual de Manejo de Desechos. Caterpillar. 1991.

Figura 7.15: Camión Volquete



Fuente: Manual de Manejo de Desechos. Caterpillar. 1991.

## 7.4.8 Volquete

Para el transporte de material inerte se emplean camiones tipo volquete con capacidad entre 8 a 12 metros cúbicos.

## 7.5 Cálculos de rendimiento

### 7.5.1 Rendimiento de Bulldozer o Tractor

El rendimiento de un bulldozer o tractor viene dado por la fórmula:

$$R = \frac{Vc * 60 * Fe * Ct}{Tc} * n = m^3/h$$

Dónde:

- Vc = Es la capacidad de la cuchilla en metros cúbicos de material esponjado.
- Fe = Es el factor de eficacia de la máquina, que depende del conductor, estado de la máquina, estado del terreno, por lo que no se puede lograr que trabaje de forma continua. El factor de eficacia varía entre un 70% - 80%.
- Ct = Es el coeficiente de transformación. Los valores medios van a ser establecidos según el material que va a ser transportado por la máquina (Cuadro 7.14), para que se cubique según su perfil, sea este esponjado o compactado.
- Tc = Es el tiempo empleado en el ciclo, el cual va a estar en minutos. Es la suma del tiempo fijo y del tiempo variable:
- Tiempo fijo es el que se emplea en maniobras. El tiempo variable depende de la distancia y de la velocidad de marcha.
- N = Es el coeficiente de gestión, acoplamiento y adaptación. Varía entre 0.8 y 0.9, es un coeficiente de reducción.

Cuadro 7.13: Clases de Terrenos			
Clase de Terreno	Perfil	Material Esponjado	Material Compactado
Tierra	1,00	1,25	0,90
Arcilla	1,00	1,40	0,90
Arena	1,00	1,10	0,95

Fuente:

### 7.5.2 Rendimiento de Retroexcavador y Pala Cargadora

El rendimiento de las excavadoras y retro excavadoras viene dado al igual que el rendimiento de la pala del cargador frontal, por la fórmula:

$$R = \frac{Vc * 3600 * Fe * Fe' * Ct}{Tc} = m^3/h$$

Dónde:

- Vc = Es la capacidad de la cuchara de las excavadoras o el cargador frontal medida en metros cúbicos.
- Fe` = Es el factor de eficacia de la máquina, que varía entre 70 y 80%.

El factor Fe' es el de eficacia de la cuchara, que depende de la clase de terreno:

Tipo de Terreno	Coeficiente
Flojo	0,90-1,00
Medio	0,80-0,90
Duro	0,50-0,80

Ct, es el coeficiente de transformación. Los valores medios se dan según el material que va a ser transportado por la máquina (cuadro siguiente), para que se cubique según su perfil, sea este esponjado o compactado.

Clase de terreno	Perfil	Material esponjado	Material compactado
Tierra	1,00	1,25	0,90
Arcilla	1,00	1,40	0,90
Arena	1,00	1,10	0,95

T<sub>c</sub>, es el tiempo de duración del ciclo en segundos, comprende en la excavación y el giro hasta la descarga, la descarga y el giro hasta origen. El tiempo del ciclo, con rotación de 90° teóricamente dependiendo del tipo del terreno, es aproximadamente:

Tipo de Terreno	Coeficiente
Flojo	15-20
Medio	20-25
Duro	25-30

### 7.5.3 Rendimiento del Volquete

El rendimiento de la maquinaria de transporte viene dado por la fórmula:

$$R = \frac{Vc * 60 * Fe}{Tc} = m^3/h$$

Dónde:

V<sub>c</sub> = Es la capacidad de la caja en metros cúbicos.

Fe = Es la Capacidad de eficacia de la máquina y está en función de la experiencia del conductor y estado de la misma, tipo de tierras a transportar y estado del terreno. El Fe varía entre el 70 y 80%.

T<sub>c</sub> (min)= Es el tiempo del ciclo, corresponde a la suma del tiempo fijo (carga, descarga y maniobra) y del tiempo variable (marcha).

La unidad de transporte de tierras se mide y abona por metros cúbicos de tierras realmente transportados, es decir, de tierras esponjadas.

#### Cálculo del número de volquetes que requiere un Cargador frontal:

$$N = \frac{Y * (T + D + L)}{60 * C * E} = Volquetas$$

Dónde:

D = Tiempo de descarga en minutos (Ej. 3 min)

Y = Coeficiente del material de carga = 35 = Para Arcillas

C = Capacidad de Carga del Volquete (Ej. 15 m<sup>3</sup>)

N = Número de Volquetes.

L = Tiempo de Carga en minutos (Ej. 10 min)

T = Tiempo de viaje en minutos (Ej. 60 min.)

E = Eficiencia, aproximadamente (Ej. 0.7)

Reemplazando se tiene:

$$N = \frac{35 * (60 + 10 + 3)}{60 * 15 * 0,7} = Volquetas$$

N = 3.48 Aprox. = 4 Volquetes

# **CAPÍTULO VIII: MONITOREO**



## CAPITULO VIII: MONITOREO

### 8.1 Monitoreo Ambiental

El monitoreo ambiental es el seguimiento permanente y evaluación de la calidad de elementos naturales (aire, agua y suelo, principalmente), a través de registros continuos, muestreos y análisis de laboratorio, que permiten determinar el estado del medio ambiente y las causas que lo condicionan.

#### 8.1.1 Monitoreo para control de aguas subterráneas y superficiales

Durante la etapa de operación del relleno sanitario se deben monitorear las aguas superficiales y subterráneas a través de los pozos o piezómetros instalados para el monitoreo y control de la posible contaminación debido a infiltraciones; es decir, el monitoreo de aguas tiene el objetivo de garantizar que el relleno sanitario está funcionando sobre lo previsto y que las capas de impermeabilización y otras medidas previstas para impedir la infiltración de lixiviados están funcionando correctamente. En caso que el monitoreo de aguas detecte contaminación, se deberán implementar las medidas correctoras correspondientes.

Así pues, el diseño del relleno sanitario debe incorporar la instalación de una red de monitoreo para el control de las aguas subterráneas, es decir, la instalación de piezómetros con el objetivo de controlar los posibles impactos del relleno sanitario al acuífero. Esta red, nos deben permitir evaluar la calidad del agua subterránea y estimar tanto las propiedades hidráulicas del acuífero como la dirección y velocidad del flujo subterráneo, de forma de poder caracterizar la hidrogeología, definir el penacho de contaminación y, si se tercia, evaluar alternativas de restauración y/o contención de la contaminación.

El muestreo debe realizarse durante la operación del relleno sanitario y posteriormente al cierre técnico. También, un botadero en el que se haya efectuado un cierre técnico debe contar con una red de piezómetros para el muestreo de las aguas subterráneas.

##### 8.1.1.1 Etapas de trabajo en el diseño y monitoreo de aguas subterráneas<sup>28</sup>

El diseño de la red de pozos de monitoreo o de piezómetros (ubicación de puntos, número de puntos, profundidad, características constructivas, etc.), es fundamental de forma de garantizar la calidad del muestreo y de los datos, así como la representatividad de las muestras.

Para la correcta instalación y uso de los piezómetros, es necesario conocer con exactitud la situación del nivel o niveles permeables que se quieren monitorear y ubicar, en consecuencia, los tramos de muestreo de las aguas. Por esta razón, hay que determinar con detalle el perfil litológico del sondeo, objetivo que puede lograrse mediante el estudio de la columna obtenida. En determinados entornos geológicos o con la finalidad de optimizar recursos es posible el empleo de métodos complementarios de caracterización geológica, como por ejemplo métodos geofísicos o de registro video gráfico (obtención de imágenes en el interior del sondeo).

Las etapas a realizar son:

- a) Análisis de información previa y estudios de campo
- b) Diseño de la red de monitoreo
- c) Implementación de la red de monitoreo
- d) Monitoreo e interpretación de resultados

<sup>28</sup> Adaptado de presentación Agencia de Residuos de Cataluña, Monitoreo de Aguas Subterráneas, Realp Elisenda, Cochabamba, 2011

**a) Análisis de información previa y estudios de campo**

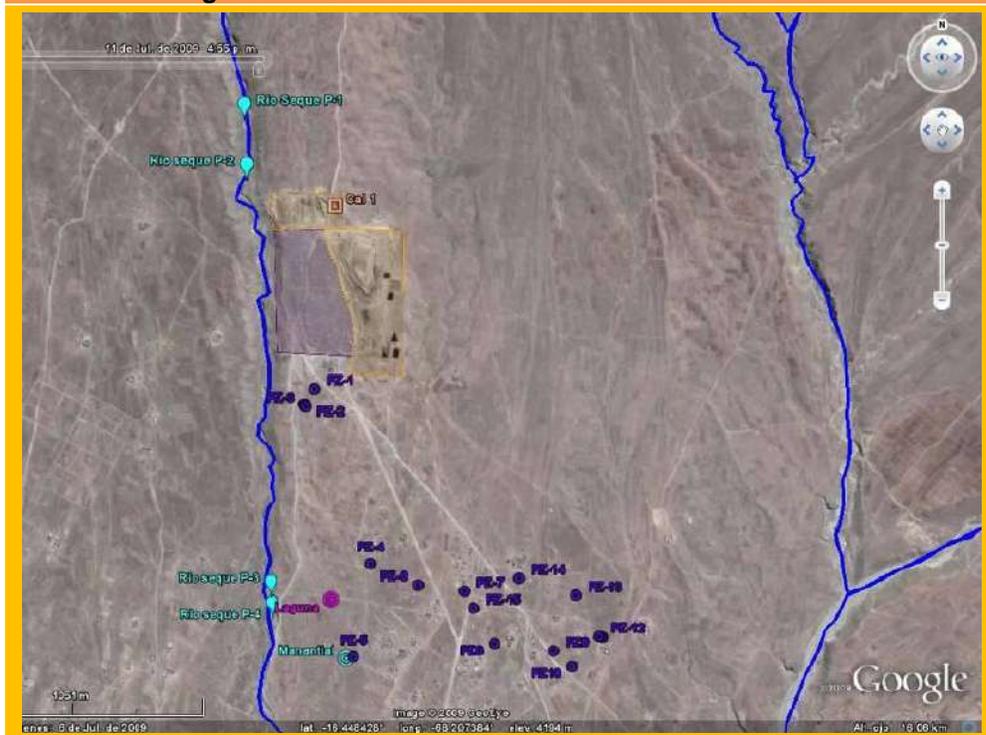
Para poder diseñar correctamente la red de piezómetros, de forma que estos estén ubicados aguas arriba del relleno y aguas abajo en la dirección correcta del flujo de aguas subterráneas, hay que partir de estudios previos geológicos, de geofísica e hidrogeológicos.

- ♻️ Recopilar toda la información geológica e hidrogeológica existente sobre la zona.
- ♻️ Descripción de la geología de la zona (cartografía geológica a detalle) y definición del marco hidrogeológico incluyendo la red de drenaje superficial.
- ♻️ Realizar un inventario de puntos de agua (pozos cercanos o manantiales).
- ♻️ Realizar análisis in-situ y medida de nivel freático de los pozos inventariados
- ♻️ Levantamiento topográfico de pozos inventariados
- ♻️ Elaborar el Mapa Piezométrico Preliminar para determinar una primera dirección de flujo
- ♻️ Los Estudios Geofísicos pueden ayudar a identificar distintos niveles acuíferos.
- ♻️ Realizar un estudio hidrogeológico preliminar.

**Cuadro 8.1: Formato de registro para el inventario de pozos noria**

Nº	Nombre de Pozo Noria	Abreviatura	Coordenadas UTM			Nombre propietario del pozo	Nº de familias que usan el pozo	Año de construcción	Fecha de inventario	Profundidad total	Dimensiones del pozo
			X	Y	msnm						

**Figura 8.1: Ubicación del Inventario de Pozos Noria**



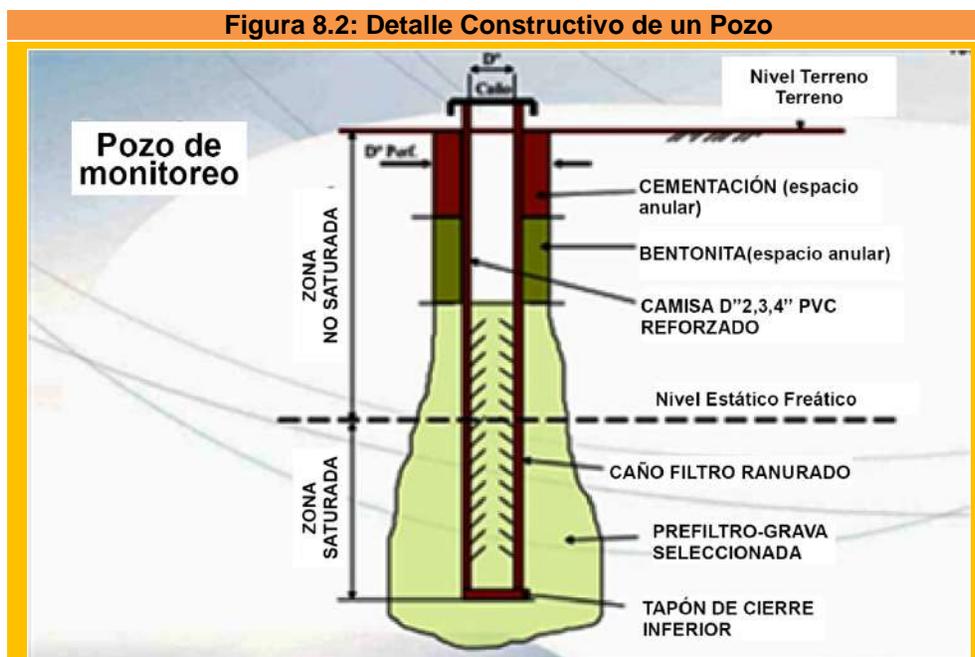
Fuente: Empresa Municipal de Aseo El Alto

**b) Diseño de la red de control**

A partir de la información de la primera etapa, se deben realizar los siguientes pasos:

- ✓ Diseñar la red de piezómetros: número, ubicación, profundidad y tipo.

- ✓ Establecer los parámetros de análisis de las aguas.
- ✓ Determinar las características constructivas de los piezómetros: Tubería de PVC o material similar con diámetro interior mínimo de 110 mm y tapón de fondo-distribución de los tramos filtrantes adaptados a las características hidrogeológicas del medio, el resto de tuberías será ciega.
- ✓ El espacio anular correspondiente al tramo filtrante será de 5 cm como mínimo constituido por grava silíceo rodada y lavada de diámetro entre 3 y 10 mm. El resto de espacio anular será correctamente cementado.
- ✓ El piezómetro se deberá resguardar mediante arqueta y sistema de cierre adecuado.
- ✓ Se deberá purgar el piezómetro después de su instalación.
- ✓ La cota de fondo del piezómetro será siempre inferior a la profundidad del vaso del relleno. En cualquier caso, la profundidad de este deberá permitir el muestreo de las aguas subterráneas subyacentes.
- ✓ La boca del piezómetro será anivelada, referenciando a una cota geográfica absoluta.
- ✓ Se adjuntará su esquema constructivo, precisando características técnicas y columna litológica.



Fuente: Curso de Instituto Argentino de Normalización y Certificación

*En rellenos sanitarios manuales, para controlar y validar la gestión de lixiviados se deben habilitar pozos de monitoreo instalados en puntos estratégicos. Las dimensiones de estos pozos podrán ser de 1 m de ancho por 1 m de largo. La profundidad depende de la napa freática.*

La Norma Boliviana NB-760 indica que:

- ♻ Se deberá contar por lo menos de dos pozos. Uno en la dirección del flujo de las aguas subterráneas a 100 m aguas arriba del relleno sanitario y otro a 100 m aguas abajo. Se instalarán siempre y cuando el nivel de agua freática este a menos de 25 m con respecto al nivel del terreno natural.
- ♻ Los pozos deberán llegar hasta dos metros por debajo del acuífero, a fin de garantizar el monitoreo del acuífero en toda su sección.

Los pozos establecidos por la norma son mínimos siendo normalmente técnicamente necesario instalar varios puntos más de muestreo de forma de garantizar el objetivo de protección ambiental requerido.

*Hay que tener en cuenta que una contaminación en las aguas subterráneas puede llegar a ser muy costosa de remediar, hasta unos niveles inimaginables, por lo que la prevención es la medida más efectiva. En este sentido, se requiere la instalación de la cantidad de puntos de muestreo que realmente proporcionen la garantía de prevención necesaria de forma de poder detectar con la máxima efectividad cualquier problema de contaminación que se pudiera estar dando.*

### c) Implementación de la red de monitoreo

Una vez definida la ubicación, profundidad y características constructivas de los piezómetros, con la justificación técnica correspondiente, hay que:

- ♻️ Instalar los piezómetros mediante máquina de perforación y empresas especializadas. La construcción de piezómetros es una tarea delicada pues la propia construcción del piezómetro o pozo de monitoreo y la propia “arqueta” o boca final del piezómetro deben garantizar que están construidas de forma correcta para evitar que se puedan convertir en vías preferenciales de infiltración de aguas contaminadas desde la superficie.
- ♻️ Limpiar y purgar los piezómetros de acuerdo a norma.
- ♻️ Referenciar topográficamente la boca del piezómetro.
- ♻️ Realizar lecturas de los niveles de agua.
- ♻️ Realizar un mapa piezométrico final, que integre todos los puntos de monitoreo y que confirme la dirección de flujo de las aguas subterráneas.

**Figura 8.1: Instalación de piezómetros o pozos de monitoreo**



Fuente: Empresa Municipal de Aseo El Alto

### d) Monitoreo e interpretación de resultados

Finalmente, instalada la red de monitoreo se deben realizar los siguientes pasos:

- ♻️ Realizar análisis de agua in-situ y en laboratorio, para lo cual se deberá contar con los medios de muestreo requeridos, muestreadores y bombas según profundidad.
- ♻️ Interpretar los resultados.
- ♻️ Los informes de monitoreo deben contemplar:

- ✓ Resultados analíticos de la red de monitoreo

- ✓ Descripción de la metodología de muestreo
- ✓ Niveles piezométricos de la zona monitoreada
- ✓ Valoración de los resultados

♻️ Proponer medidas de mitigación si son necesarias.

### 8.1.2 Monitoreo del sistema de captación de lixiviados

Durante la etapa de operación del relleno sanitario se deben monitorear tanto las aguas de cursos de agua superficial como de los pozos de monitoreo o piezómetros instalados para el monitoreo y control de la posible contaminación debido a infiltraciones.

El monitoreo de aguas tiene el objetivo de garantizar que el relleno sanitario está funcionando sobre lo previsto y que las capas de impermeabilización y otras medidas previstas para impedir la infiltración de lixiviados están funcionando correctamente. En caso que el monitoreo de aguas superficiales y subterráneas detecte contaminación, se deberán implementar las medidas correctivas correspondientes.

El programa de monitoreo de aguas superficiales y lixiviados, tiene como objetivo, conocer en forma precisa las condiciones del acuífero, aguas abajo y aguas arriba del sitio de disposición final. Con esto se asegura que el acuífero no ha sido contaminado por lixiviados generados por los residuos sólidos.

Se debe realizar controles de fisuras en los canales o drenes de captación y conducción de los lixiviados, de forma de verificar su limpieza y libre circulación de los lixiviados para su almacenamiento en piscinas y posterior tratamiento.

Asimismo, se debe verificar que se construyan adecuadamente los drenes internos para lixiviados en las nuevas celdas y que no se dañen o se coloquen obstrucciones en la celda en operación.

Las labores de rutina requieren inspección, limpieza, y mantenimiento de los canales de drenaje. Estas labores requieren de un manual de labores. Se debe tener en cuenta que después de los efectos de temporada como: vientos y transporte de vegetación o vientos fuertes que transporten polvo y diversos materiales, estos se pueden acumular en los canales y podrían causar un bloqueo o cubrir por completo los canales y complicarse la situación con la ocurrencia de una lluvia severa. Los canales de drenaje deberán ser limpiados como mínimo, cada seis meses y de manera más continúa en zonas en donde la temporada de lluvias es más regular

En el caso de las piscinas de acumulación de lixiviados, se debe verificar: la estabilidad de los taludes, el nivel de llenado y realizar el mantenimiento superficial de las capas de geomembrana que cubren la base de las balsas de almacenamiento de lixiviados. En caso de amenazas de importancia que comprometan la estabilidad de las piscinas, deberán realizarse obras mayores (muros de gaviones, soportes de llantas u otros) de modo que se garantice la estabilidad de éstas.

Se debe realizar controles periódicos del sistema de almacenamiento y tratamiento de lixiviados:

- ♻️ Realizar un control de la infraestructura de forma de verificar que no existan fugas o agrietamientos que puedan ocasionar derrames en lo futuro.
- ♻️ Verificar niveles de sedimentos en las piscinas de tratamiento.
- ♻️ Verificar nivel de altura de los lixiviados antes de la época de lluvia de forma de estar preparados contra contingencias.
- ♻️ Realizar los controles analíticos correspondientes del lixiviado que entra y que sale del sistema de tratamiento, así como los controles intermedios requeridos para garantizar que el tratamiento funciona como lo esperado.

Se recomienda monitorear como mínimo, los siguientes parámetros:

Cuadro 8.2: Parámetros a Monitorear en Aguas Superficiales y Subterráneas	
Parámetro	Frecuencia
pH	Semestral
Conductividad	Semestral
Oxígeno Disuelto	Semestral
Metales Pesados	Semestral
DQO, DBO <sub>5</sub>	Semestral
Amoníaco	Semestral
Nitratos	Semestral
Nitritos	Semestral

Fuente: Parámetros a ser monitoreados de acuerdo NB-760

Se recomienda una vez al año incluir los parámetros relativos a compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles (COV's y COVS's) de forma de identificar la posible contaminación de este grupo de contaminantes.

Para el monitoreo de las aguas superficiales se identificarán los cursos de agua superficial y se marcarán varios puntos de muestreo, que se analizarán también de forma semestral-anual con los mismos parámetros.

A pesar de no contar con una reglamentación del contenido específico del lixiviado que puede ser vertido a cauce público, se puede tomar los límites permisibles del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) de la Ley 1333 del Medio Ambiente.

Para usos internos del lixiviado tratado dentro del relleno (como riego para zonas clausuradas), los valores pueden no ser tan estrictos pero deben ser autorizados por la autoridad competente.

### 8.1.3 Monitoreo del Tratamiento de Gases

Durante la etapa de operación se debe controlar la construcción de los drenes para gas (chimeneas) de forma que se realice una compactación adecuada al contorno, así mismo que la maquinaria no golpee los drenes y estos se mantengan verticales desde la base hasta la cobertura final, el relleno sanitario con material adecuado piedra bolón de dimensiones adecuadas (6" a 8"). El monitoreo debe realizar la revisión visual y limpieza manual rutinaria del sistema de captación (captadores verticales ya sean de captación pasiva que es lo más habitual en nuestro medio o de captación activa, red de conducción (si existe) y quemadores de biogás (individuales o colectivo) instalados para verificar su buen funcionamiento.

También se deberá inspeccionar debidamente el sitio para la detección de fugas en las capas superficiales para su inmediato sellado.

En rellenos mecanizados grandes, se debe realizar un control del contenido de gas metano en las celdas antiguas ya cerradas mínimamente 2 veces al año, de forma de evitar explosiones en las chimeneas.

### 8.1.4 Controles durante la operación de las celdas

El crecimiento y la forma del cuerpo de los residuos se debe observar cuidadosamente. Los controles más importantes son:

-  Peinado de Taludes: Consiste en el colocado de la capa de sellado y perfilado en los taludes, con un espesor promedio de 0,6 m. Los taludes del terreno se deben conformar de tal manera que no causen erosión y puedan darle buena estabilidad al relleno. Estos pueden ser desde verticales hasta 3:1 (H:V), dependiendo del tipo de suelo. Las terrazas deben tener

una pendiente del 2% hacia los taludes interiores para conducir las aguas de lixiviado a los drenajes, y evitar encharcamientos cuando se usen como vías temporales de acceso; lo anterior contribuye también a brindar mayor estabilidad a la obra<sup>29</sup>.

-  La altura actual del cuerpo de residuos sólidos: Para rellenos grandes construidos como colina artificial, se recomienda realizar un levantamiento topográfico de las celdas ya terminadas y las celdas en operación cada año o cada dos años, con el fin de detectar asentamientos del suelo y comparar el verdadero crecimiento del cuerpo de residuos sólidos con las proyecciones anteriormente hechas.
-  Es importante tener en cuenta que el material biodegradable, la humedad y la pérdida de material por causa de descomposición de los residuos sólidos orgánica bajan la estabilidad del conjunto de residuos.
-  Se deben tomar en consideración dos tipos de inclinación: La inclinación del terreno, si el saneamiento del botadero se realiza en un área inclinada (como en una quebrada seca), y la inclinación del talud del conjunto de los residuos.
-  Existen dos criterios importantes para optimizar la inclinación del talud: si el talud es muy inclinado, el volumen disponible crece proporcionalmente, pero baja la estabilidad de los residuos confinados y en consecuencia, hay más peligro de caídas del material.
-  Nivelación de Banquinas: Las banquinas serán niveladas superficialmente, confiriéndoles una inclinación media del 4%, esta inclinación favorece la evacuación de agua longitudinalmente y su aprovechamiento mediante la infiltración de las retenciones de agua a producirse en las banquinas para el aprovechamiento por la vegetación.
-  Acordonado de Banquinas: Con el fin de contener las aguas de drenaje y evitar la erosión de los taludes en caso de flujos importantes, al extremo de las banquinas se debe colocar un cordón de tierra que cumple dicha función. Este acordonado además sirve para la retención de semillas vegetales de los taludes superiores que llegan a las banquinas producto del arrastre por aguas pluviales. Este acordonamiento solo se efectúa con carácter preventivo.
-  Instalación de Drenes en las Banquinas: Para permitir el fácil escurrimiento de aguas superficiales, se deben formar y mantener los drenajes en las banquinas que conduzcan las aguas superficiales hacia los canales de drenaje pluvial. Preferentemente los drenajes formados al pie de talud deberán ser de tierra ya que la impermeabilización de los mismos produce una gran pérdida de material reproductivo (semillas, estolones, etc.) que desciende desde los taludes por arrastre de aguas pluviales.

### 8.1.5 Control de Fuego

En un relleno sanitario con buen manejo, la presencia de fuego abierto es muy poco probable. Si el fuego se inicia, este debe de ser extinguido lo más pronto posible para prevenir su extensión en todo el relleno sanitario<sup>30</sup>.

En los sitios de disposición final hay gran cantidad de material con alto poder calorífico, fácilmente inflamable y/o explosivo. En ocasiones llegan residuos aún en combustión. Por otra parte, los segregadores voltean los residuos sólidos porque les deja al descubierto el material que no han podido recuperar posibilitando la aireación que contribuye a la generación de incendios. Hay que tener en cuenta además que durante la degradación de la materia orgánica también se produce gas metano inflamable.

Lo más importante para controlar los incendios es mantener un estricto control sobre los pequeños focos que se presentan y que se deben apagar prioritariamente. Si se observa humo o una pequeña llama y se apaga inmediatamente se puede evitar un gran incendio. Las medidas a tomar en este sentido son:

-  Elaborar un plan de emergencias contra incendios
-  Instalar extintores portátiles y tener operativo un extintor en el frente de trabajo;

<sup>29</sup> Guía Básica para el Manejo Ambiental de Rellenos Sanitarios, Programa Nacional de Competitividad, Costa Rica

<sup>30</sup> Guía ambiental para el saneamiento y cierre de botaderos a cielo abierto, Ministerio de Medio Ambiente, 2002, Colombia

-  Realizar cursos de capacitación a todo el personal
-  Contar con un acopio de tierra en el frente de trabajo para poder recubrir residuos encendidos;
-  Prohibir fumar en todo el recinto, con excepción de zonas identificadas en el sector de oficinas y mantención.
-  Controlar periódicamente el funcionamiento del sistema de captación de gas.
-  No usar agua para la extinción de fuegos en el relleno sanitario.

En caso de pequeños incendios los pasos a seguir son:

-  Cubrimiento con tierra en abundancia (mínimo 80 cm. por encima de las llamas)
-  Consolidación o compactación de los residuos con un pisón de mano, de barril o con un bulldózer (por lo menos 5 pasos de tractor o su equivalente, con el pisón de mano), acción que se realiza hasta tener la certeza que el humo que sale sólo es vapor de agua. Pasada una hora después de la compactación inicial se debe volver a compactar para evitar futuros incendios.
-  Someter estos focos de pequeños incendios a estricto control durante los días siguientes y cada vez que se observe humo repetir las operaciones uno y dos.

### 8.1.6 Control de plagas

Las plagas pueden ser grandes incomodidades y causa de problemas de salud para los operadores de los rellenos sanitarios. Las moscas y los mosquitos son dos tipos de insectos de principal preocupación por la transmisión de enfermedades. Las moscas transmiten muchas enfermedades, como salmonela, mediante el traslado físico de la bacteria desde los residuos a las fuentes de alimento. Los mosquitos se reproducen en agua colectada en depresiones de los rellenos sanitarios y en zonas descubiertas y no compactadas, los mosquitos transportan enfermedades como encefalitis, fiebre del dengue y la malaria.

El control de estos incluye la compactación y la cobertura de los residuos, donde el agua de lluvia tiende a acumularse. Es necesario cubrir esas depresiones para eliminar los lugares de reproducción de mosquitos.

Las ratas y otros roedores transfieren enfermedades como la rabia, fiebre de mordedura de rata, leptospirosis, tifus y la plaga bubónica. Los roedores se reproducen dentro de las áreas del relleno sanitario o migran de zonas cercanas al relleno sanitario, ellos se mantienen en el lugar si encuentran facilidades de alimentación, madrigueras y agua. Mediante una cobertura diaria, apropiada compactación, y una cubierta de zonas de depresión y posible almacenamiento de agua, se eliminan tres necesidades.

# **CAPÍTULO IX: CIERRE DEL RELLENO SANITARIO**



## CAPITULO IX: CIERRE DEL RELLENO SANITARIO

Concluida la vida útil del relleno sanitario, se inicia la etapa de cierre hasta lograr su integración con el medio que lo rodea, de manera sostenible.

Este proceso se formaliza con la formulación del plan de cierre, el mismo que debe detallar las obras y actividades destinadas a mantener las condiciones anaeróbicas de la disposición de los residuos en la infraestructura, controlar la migración de biogás y lixiviados y la integridad de la infraestructura luego de finalizadas las operaciones de disposición final de residuos.

El cierre del relleno sanitario, da por finalizada la explotación del relleno sanitario, en esta, se realiza el desmantelamiento de las instalaciones, limpieza superficial y la colocación de una capa de recubrimiento de características similares a la cobertura periódica, que se empleó durante la explotación del relleno pero por lo general con un espesor y características de impermeabilidad mayor.

### 9.1 Diseño de la capa final

El diseño de la capa final constituye el sellado del relleno sanitario, aquella operación que se realiza después del cierre y que tiene eventualmente como objetivo preparar la superficie para realizar las futuras obras de rehabilitación del área.

Como se ha visto en el capítulo 7, apartado 7.2.4, el propósito de la cubierta final de un sitio de disposición final es aislar a los residuos más superficiales del ambiente, para minimizar la migración de líquidos en las celdas y controlar el venteo del biogás generado. Un sistema de cobertura final debe ser construido tomando en cuenta las condiciones descritas en la NB-760, para que cumpla con las funciones anteriores, aunando a un mínimo mantenimiento del drenaje adecuado, reduciendo la erosión y asentamientos, con una permeabilidad muy baja.

Cuando se cierra el relleno sanitario se debe construir una cubierta final más elaborada que las cubiertas diarias. El material más apropiado para la construcción de la cubierta final es una tierra arcillosa o limosa con el fin de asegurar una impermeabilidad máxima y minimizar la generación de aguas lixiviadas.

Previa a la construcción e instalación de las diferentes capas que componen la cobertura final, se debe proceder a la nivelación del suelo con una capa de tierra común con el fin de asegurar las condiciones óptimas que permitan el desarrollo de las actividades que se ejecutaran posteriormente.

La cobertura final estará conformada por tres capas: una capa de soporte, una capa de barrera hidráulica (capa impermeable) y una capa vegetal (de apoyo para material el crecimiento de las especies vegetales).

En función del tipo de relleno, es conveniente incluir capas para el drenaje de gases previo a la capa de impermeabilización y para el drenaje de aguas previo a la capa vegetal.

De la capa de residuos hasta la capa final, de forma general el orden sería el siguiente:

Cuadro 9.1: Capas necesarias para la Cubierta Final				
Nº	Capas necesarias	Material	Relleno mecanizado	Relleno manual
1	Capa de soporte o de asentamiento de espesor de 0,3 - 0,5 m	Tierra de cobertura	Si	Si
2	Capa de drenaje de gas, con espesor mayor a 50 cm	Piedra bola, grava o equivalente *	Si	No
3	Capa impermeable de material arcilloso espesor 0,4 m– 0,6 m	Limo arcilloso o arcilla de impermeabilidad suficiente**	Si	Si
4	Capa de drenaje de aguas de lluvia espesor: 0,3 m	Capa de gravas permeabilidad superior o igual $10^{-3}$ cm/s***	Si	No
5	Capa vegetal espesor 0,7- 0,8 m	Suelo natural enriquecido con humus o compost	Si	Si

\* Puede usarse un material sintético tipo geodren o geocompuesto drenante

\*\* Si no se dispone de arcilla con suficiente impermeabilidad, puede optarse por materiales sintéticos, como geocompuesto bentonítico o lámina de geomembrana de polietileno con geotextil de protección.

\*\*\* Puede usarse un material sintético tipo geodren o geocompuesto drenante

Fuente: MMAyA/VAPSB/DGGIRS

Para algunos rellenos pequeños, se podrá plantear un sistema mínimo de cobertura final para el sellado, siempre que cuente con la correspondiente justificación técnica y aprobación por las autoridades ambientales. Este sistema consiste en la colocación de una capa de suelo con un espesor mínimo de 60 cm. con características de franco arcilloso de suficiente impermeabilidad y posteriormente una capa vegetal para la siembra.

En todo caso, cualquier modificación de las especificaciones del cuadro anterior deberá ser propuesta y justificada técnicamente para la aprobación de la autoridad ambiental correspondiente.

### Capa de Soporte

La capa de soporte es la capa de tierra común colocada sobre la última capa de cobertura de los residuos sólidos. Esta capa es compactada por el paso sucesivo del equipo pesado de compactación.

El espesor será de aproximadamente 50 cm. Se recomienda construir esta capa en dos etapas, cada una de 20 - 30 cm de espesor, con un intervalo de aproximadamente un mes para tratar de cubrir los asentamientos que se produzcan en esta primera capa.

La inclinación final que debe tener la cubierta superior del 2% como mínimo, para permitir el drenado de las aguas superficiales.

Se debe dirigir las pendientes de esta capa hacia el sistema de drenaje perimetral de las celdas.

### Capa de Drenaje de Gases

Esta capa se dispone para favorecer la captación del biogás y evitar asentamientos diferenciales que afecten a la estabilidad de la masa de residuos.

Esta capa será imprescindible y de especial importancia en el caso de usar geomembrana de PEAD como capa de impermeabilización, de forma de evitar bolsas de gas en la superficie.

En caso de no contar con material natural puede usarse material sintético tipo geocompuesto drenante o geodren.

### **Capa impermeable**

Luego de la cobertura de tierra común, se recomienda realizar el cubrimiento con material de textura limo-arcilloso bien compactado a fin de impermeabilizar el sitio evitando que el agua alcance los residuos enterrados. Se recomienda que la capa de impermeabilización sea de 40 a 60 cm, en función del tipo de relleno. Esta debe tener, en condiciones ideales, una permeabilidad de  $10^{-6}$  cm/s a  $10^{-7}$  cm/s. Las condiciones de compactación e impermeabilidad deben lograrse con una masa homogénea, con un contenido de humedad del 2% al 3% por encima de la humedad óptima y alto grado compactación.

En caso de no disponer de material natural con la suficiente impermeabilidad, se pueden usar materiales sintéticos que permitirán alcanzar niveles altos de impermeabilidad. Como se indicó, se puede aplicar Geomembrana de 1 – 1,5 mm. En condiciones óptimas, la geomembrana debería estar precedida por debajo y por encima de un geotextil de protección de 200 gr. En el caso de usar geomembrana, hay que cuidar su colocación especialmente en el sellado entre láminas. También en este caso, la capa de drenaje de gases es imprescindible de forma de garantizar la salida de estos hacia los captadores de venteo y evitar la formación de gases que podrían generar bolsas en la superficie y afectar a la estabilidad de la masa de residuos.

### **Capa de drenaje de aguas de lluvia**

Esta capa debe permitir captar las aguas de lluvia que hayan logrado traspasar la capa vegetal, de forma de garantizar su drenaje.

Es muy importante colocar una capa de geotextil filtrante entre las gravas y la capa vegetal con el objetivo de impedir la colmatación de las gravas y garantizar su papel drenante a lo largo del tiempo.

Las aguas drenadas deben ser desviadas a los drenajes externos de pluviales. Se puede valorar la posibilidad del uso de materiales sintéticos como son el geodren o geocompuesto drenante.

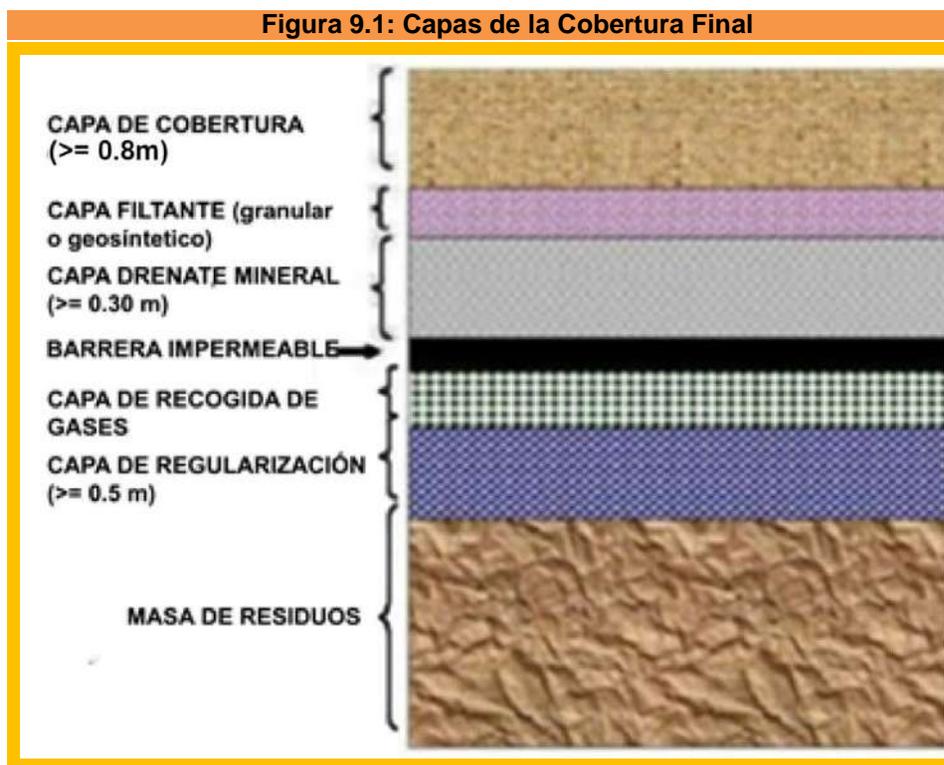
### **Capa vegetal**

La capa superficial o vegetal promueve la evapotranspiración y ayuda a controlar la erosión por el viento y el agua y es el soporte de la vegetación. Se colocará después de la capa impermeable. Posteriormente, se recubrirá con la tierra fértil y se adaptan especies vegetativas nativas.

Se recomienda poner una primera capa de tierra de 50 cm y una segunda de 30 cm de tierra enriquecida con humus o compost.

La capa vegetal será extendida sobre la capa impermeable compactada o sobre de la capa drenante en función del tipo de cobertura. Se deberá incorporar en la misma una fertilización orgánica antes de iniciar el sembrado y su espesor dependerá de las especies a ser sembradas sobre la misma. Preferentemente éstas deberán ser especies de escasa profundidad radicular y de desarrollo vegetativo agresivo para facilitar su expansión sobre la capa vegetal de las celdas. Las especies vegetales implantadas deben ser resistentes a deficiencias hídricas y nutricionales, tolerantes a temperaturas extremas y permitir una alta tasa de evapotranspiración.

La figura siguiente presenta el perfil de las capas:



Fuente: Agencia de Residuos de Catalunya

## 9.2 Mantenimiento de las Obras de Cierre Técnico del Botadero

La infraestructura civil del relleno sanitario debe ser mantenida en condiciones adecuadas de operabilidad a lo largo del periodo de cierre y mantenimiento post-clausura.

Anualmente debe ejecutarse un programa de mantenimiento preventivo de las construcciones civiles: sistema de canales de conducción de aguas pluviales, sistema de control hídrico de quebradas y torrenteras, cerca perimetral, vías de acceso externas e internas, etc. Es decir todas las obras civiles que se encuentren dentro los predios del relleno sanitario.

Las actividades de mantenimiento del relleno sanitario, en función del tamaño y magnitud de éste, se ejecutarán durante un periodo de 10 - 15 años y tendrán carácter preventivo y ocasionalmente correctivo.

### 9.2.1 Mantenimiento de las Vías de Circulación

Para los caminos interiores, que son las arterias vitales para lograr un adecuado mantenimiento del sitio, se debe garantizar que estén siempre transitables. El mantenimiento deberá considerar las labores de rellenado de agrietamientos, el riego de caminos con agua y la limpieza de cunetas para evitar el azolvamiento.

### 9.2.2 Mantenimiento de la Cobertura Final

Se debe tener en cuenta que el mantenimiento de largo plazo tiene el objetivo de resolver problemas provocados por las lluvias y el viento, como las depresiones y erosiones. Es importante que dichos problemas se reparen a la brevedad posible para evitar que los residuos queden al descubierto y que puedan provocar problemas ambientales.

Debido a las precipitaciones pluviales como también a las corrientes de aire fuertes, la cobertura final podría sufrir deterioros con el pasar del tiempo, por lo que se debe de realizar trabajos manuales que consistirán en el rellenado de grietas y depresiones a fin de contrarrestar los daños producidos por estos fenómenos naturales en taludes y plataforma que producen asentamientos y agrietamientos.

### 9.2.3 Mantenimiento de la cobertura vegetal en la celda

Con el fin de preservar la cobertura vegetal en taludes y banquinas de la celda, fruto de la experiencia en la parquización se recomienda extender sobre la capa vegetal un manto de restos de poda que sirve de protección en la época seca y al mismo tiempo se incorpora materia orgánica al suelo. Esta práctica garantiza el prendimiento y sostenibilidad de la parquización en el tiempo.

Para este fin, los restos de poda recolectados en la limpieza de la ciudad son trasladados hasta el relleno sanitario deberán ser acopiados en un área específica para tal fin hasta que se disponga su utilización. Alternativamente, deberá implementarse proyectos de compostaje utilizando los restos de poda y otros materiales de residuos sólidos orgánicos disponibles que vea por conveniente el operador, de forma de obtener compost que pueda ser usado para la revegetación del lugar así como el mantenimiento de ésta.

### 9.2.4 Mantenimiento de áreas verdes

Debe considerarse la provisión de equipos y material auxiliar, como ser: bombas, mangueras y aspersores destinados al riego. El riego en lo posible deberá ser tecnificado (goteo o aspersión) de manera que se logre un máximo aprovechamiento del agua, y se minimice la infiltración del exceso de agua hacia capas más profundas resultando en un incremento de la generación de lixiviados, caso contrario los encargados del regado deberán tener la capacitación y el criterio suficientes para aplicar una lámina de riego apenas suficiente para alcanzar la capacidad de campo en los primeros 0, 2 a 0,3 m de profundidad.

Se deberá realizar una vez al año, la fertilización orgánica (estiércol, compost, humus, etc.) en las áreas parquizadas. Esta fertilización preferentemente deberá ser realizada con las primeras lluvias de la época lluviosa.

### 9.2.5 Mantenimiento del sistema de drenaje de aguas superficiales

El control de drenajes en el relleno sanitario comprende la entrada y salida de aguas superficiales. Por lo tanto, los canales de conducción de aguas superficiales deben ser mantenidos realizando su limpieza, reparación de geomembranas que hayan sufrido desgarros y/o fisuras en los canales de cemento y piedra.

### 9.2.6 Asentamiento en celdas

Las depresiones en este tipo de obras de cierre técnico son comunes debido a la compactación natural que sufren los residuos con el paso del tiempo, por lo que tiende a formarse en la superficie de la cubierta final depresiones (hundimientos, agrietamientos). Las acciones a tomar tienen como objetivo evitar la acumulación de agua pluvial en estas depresiones y su posterior infiltración.

Durante el tiempo en que las emisiones de gases se vayan reduciendo, las obras de mantenimiento estarán referidas al control y reparación de la cobertura final, la cual por efecto de la reducción de volumen de los residuos sólidos en proceso de degradación, promoverán la variación de las pendientes en la capa de cobertura final.

Los asentamientos se podrán controlar, mediante levantamientos topográficos dejando mojones o estacas de señalamiento en los puntos para realizar el seguimiento de los mismos, de este modo se generará una base de datos de seguimiento para evaluar la biodegradación.

### 9.2.7 Adecuación y mantenimiento de taludes y banquinas

Debido al proceso de degradación de los residuos sólidos confinados (residuos orgánicos), los taludes y banquinas de la celda experimentan deformaciones en grados variables. Los mismos deberán ser solucionados de acuerdo a su magnitud, manualmente o con apoyo de maquinaria pesada manteniendo las pendientes de construcción para evitar deslizamientos y erosiones.

La estabilidad del talud está considerada como uno de los factores de mayor importancia para el cierre técnico y deberá estar acorde al tipo de residuos sólidos depositados en el sitio y el diseño conceptual de la superficie final del lugar.

En taludes con notorios signos de erosión (cárcavas) se deberá realizar el seguimiento de los mismos y de acuerdo a la evaluación del riesgo que representen se deberán realizar obras mayores de estabilización que garanticen la estabilidad de los mismos.

### 9.2.8 Mantenimiento del sistema de captación de lixiviados

Como medida de control de la eficacia del sellado, debe realizarse semestralmente el monitoreo de las aguas superficiales que son evacuadas en la parte baja de la zona de intervención.

Es necesario que todo el sistema de recolección, cámaras de inspección, mangueras y piscinas de almacenamiento de lixiviados, sea controlado efectivamente. Como resultado del asentamiento de la celda, es previsible que muchos de los canales y sistemas internos de conducción de lixiviados se vean afectados. Por lo que, deberá reparar de manera inmediata cualquier falla detectada.

Se deberá limpiar rutinariamente los sólidos en suspensión de las cámaras de inspección para evitar taponamientos de los ductos que ocasionen rebalses y fugas.

### 9.2.9 Mantenimiento de piscinas de almacenamiento de lixiviados

En las piscinas de acumulación de lixiviados, se debe verificar la estabilidad de los taludes, el nivel de llenado y realizar el mantenimiento superficial de las capas de geomembrana que cubren la base de las piscinas de almacenamiento de lixiviados.

En caso de amenazas de importancia que comprometan la estabilidad de las piscinas, deberán realizarse obras mayores (muros de gaviones, soportes de llantas u otros) de modo que se garantice la estabilidad de éstas.

### 9.2.10 Mantenimiento del sistema de captación de biogás

Consiste en la revisión visual y limpieza manual rutinaria del sistema de captación (captadores verticales ya sean de captación pasiva que es lo más habitual en nuestro medio o de captación activa, red de conducción (si existe) y quemadores de biogás (individuales o colectivo) instalados para verificar su buen funcionamiento.

También se deberá inspeccionar debidamente el sitio para la detección de fugas en las capas superficiales para su inmediato sellado.

El estado de las plantas es un buen indicador para identificar si hay fugas de gas. Como el metano tiene un impacto asfixiante sobre muchas plantas, tanto en la atmósfera como en el suelo, un sitio con considerable menor densidad de vegetación indica una fuga de gas.

### 9.3 Reforestación de las celdas antiguas y estabilizadas<sup>31</sup>

La arborización de un relleno sanitario es un tema muy importante. Se debe comenzar con este trabajo durante la construcción del relleno y continuar durante todo el periodo operativo. Después del cierre final, se deben sembrar plantas de la región adecuadas sobre todas las celdas cerradas o sobre la colina artificial entera. La arborización del relleno sanitario ayuda considerablemente a minimizar daños ambientales; además, contribuye a estabilizar los taludes y disminuye la cantidad de las emisiones.

El cerco vivo es muy importante, ya que en muchos sitios no existe una barrera natural. Se recomienda plantar un cerco vivo de 30 – 50 m de ancho, usando arbustos en los bordes y árboles más altos en el centro. Con el cerco vivo, se puede desviar los vientos y se reduce considerablemente la molestia causada por malos olores en los alrededores.

La forestación de los predios del relleno sanitario tiene diversos fines dependiendo del sitio donde se realiza esta actividad, los cuales son:

- a) Forestación en taludes: Aminora los efectos erosivos de las lluvias y escorrentías, mejora la estabilidad de los taludes.
- b) Forestación perimetral: Tiene como objetivo principal, cumplir con la NB 760 respecto al área de amortiguamiento además de servir como cortina rompe vientos.
- c) Forestación en bordes talud-banquina: Mejora la estabilidad en la orilla de la banquina y además agrega un diseño paisajístico al lugar

De manera general, la forestación comprende básicamente los siguientes pasos:

1. Obtención de los plantines: idealmente los plantines forestales y arbustivos a ser implantados dentro el botadero deberán ser producidos *in situ*, esto significa, implementar un pequeño vivero dentro el botadero para la obtención de los plantines, caso contrario podrán ser obtenidos del mercado.
2. Hoyadura: Cavar los hoyos donde se realizara la plantación cuyas dimensiones dependerán de las especies que serán utilizadas y la edad de los plantines.
3. Abonado base: Una vez realizados los hoyos se deberá realizar la fertilización orgánica (estiércol, lama, humus, etc.) combinada con suelo blando.
4. Plantación: Se realizara preferentemente en días nublados a primeras horas de la mañana, apisonando adecuadamente la tierra alrededor de las raíces del plantín.
5. Riego: Inmediatamente luego de la plantación se realiza el riego hasta alcanzar capacidad de campo.
6. Labores culturales: Comprenden los cuidados necesarios para que la planta desarrolle adecuadamente y sea auto sostenible en el tiempo.

#### 9.3.1 Barreras Rompe Vientos

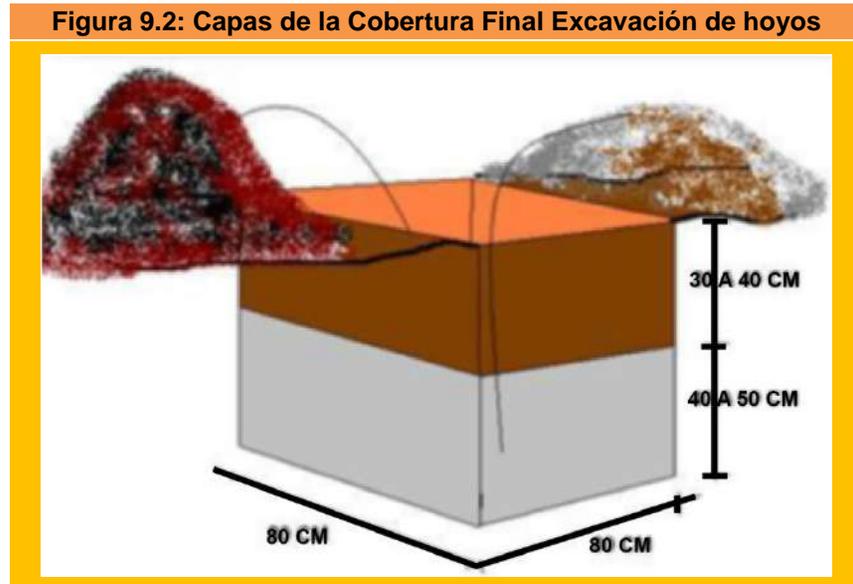
Las barreras rompe vientos disminuyen la velocidad de los vientos que varían tanto en velocidad como en su dirección, es posible reducir su energía y desviarlo. Cuando el viento choca contra una barrera protectora el aire puede moverse en tres direcciones a través, sobre o alrededor de ella. La cantidad de aire que pasa la barrera depende de la porosidad de la barrera protectora. Las barreras protectoras de porosidad media (permeabilidad de 40 a 50 %) logran la más efectiva reducción de velocidad.

La primera etapa en el diseño de un sistema de resguardo contra el viento es la recolección de datos sobre el viento principalmente su dirección y velocidad

<sup>31</sup> Adaptado de Informe III, Planes de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos, Ingeniería Básica, Evaluación de Impacto Ambiental, BID, Consorcio de Gestión Integral, 2012.

Es importante tomar en cuenta antes de comenzar a plantar los árboles rompe vientos la preparación del terreno, la selección de plantas y las técnicas de plantación para asegurar el buen establecimiento de las barreras vivas.

Para garantizar el prendimiento de las plantas, es recomendable realizar la excavación de los hoyos con mucha anterioridad a la plantación, con el único propósito de oxigenar el suelo apelmazado, no menos de un mes. Los primeros 30 a 40 cm de suelo depositar a un lado de la excavación y los subsiguientes centímetros de suelo colocar en otro sector como indica la figura siguiente:



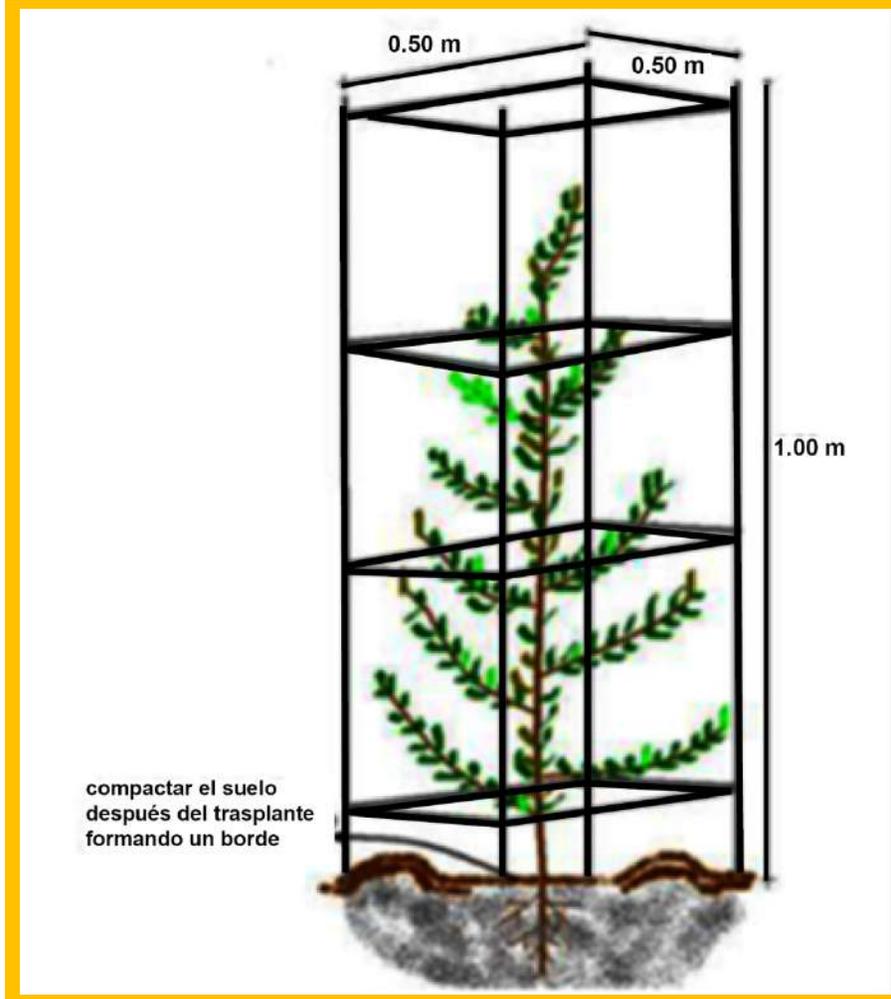
Pasado el tiempo de meteorización del hoyo se deposita la tierra de los primeros 30 a 40 cm de suelo previamente fertilizado con abono natural en una cantidad de 2 a 3 kg de abono/hoyo al fondo y sobre esta se coloca la planta sosteniéndola con el sustrato que viene de los restantes centímetros de hoyo.

### 9.3.2 Plantación de especies forestales

El trasplante de las especies se debe realizar conforme las recomendaciones técnicas para cada especie. Sin embargo, algunas consideraciones importantes que se deben tomar en cuenta, son:

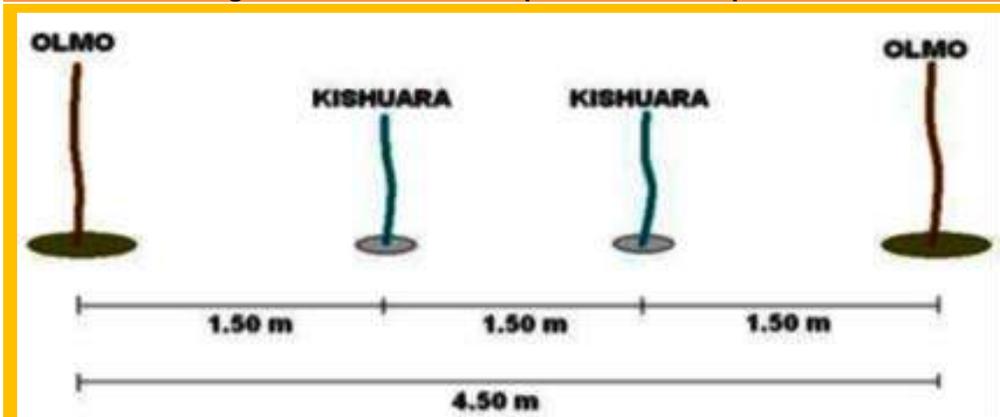
- ✓ Elegir plantas de calidad para la plantación
- ✓ Fertilizar el suelo al momento de la plantación
- ✓ Asegurarse que las raíces de la planta entren en contacto directo con el suelo (apisonar).
- ✓ Proporcionar riego abundante
- ✓ Colocar protección individual para las plantas.

**Figura 9.3: Cuantificación de especies a plantarse en el perímetro del relleno sanitario**



Fuente: Adaptado de Informe III, Planes de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos, Ingeniería Básica, Evaluación de Impacto Ambiental, BID, Consorcio de Gestión Integral, 2012.

**Figura 9.4: Distancias de plantación de especies**



Fuente: Adaptado de Informe III, Planes de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos, Ingeniería Básica, Evaluación de Impacto Ambiental, BID, Consorcio de Gestión Integral, 2012.

### 9.3.3 Época de plantación

Dependiendo de algunas manifestaciones o indicadores bioclimáticos que nos anuncian clima estable y además existiendo disponibilidad de riego para las plantaciones de especies forestales se deberán realizar a fines del mes de septiembre hasta mediados de octubre.

### 9.3.4 Técnicas de plantación

La obtención satisfactoria de resultados no es más que la constancia en el trabajo sistemático realizado con el propósito de obtener mayor porcentaje de prendimiento y ante todo lograr árboles de calidad, que repercuten indiscutiblemente en la buena imagen del conjunto de las plantas en la barra rompe viento.

La técnica es determinante para el establecimiento de plantaciones uniformes, es por esto que describiremos a continuación los pasos que deben seguirse para la plantación de especies forestales.

- ✓ Adquirir plantines de calidad.
- ✓ Realizar los hoyos con anterioridad a la plantación.
- ✓ Fertilización orgánica del suelo al momento de la plantación.
- ✓ Apisonar el suelo después de la plantación.
- ✓ Riego dos veces por semana durante el primer mes.
- ✓ Reemplazar inmediatamente las plantas que pudieran haber muerto.

Los subsiguientes días al transplante se debe proporcionar riego interdiario hasta lograr el prendimiento de los arbolitos forestales, posteriormente disminuir el intervalo hasta llegar a una vez por semana que se realiza en la temporada de lluvia.

**Figura 9.5: Cortina Arbórea o Barrera Vegetal para el Relleno Sanitario**



## 9.4 Actividades de monitoreo ambiental Post – Cierre Técnico

El monitoreo y el seguimiento está encaminado a realizar una observación continua en el tiempo y el espacio a las variables ambientales y sus indicadores los cuales muestran y determinan el comportamiento y evolución de los aspectos físicos, bióticos y socioeconómicos de un sistema de disposición final de residuos sólidos y de su área de influencia. Se constituye en el instrumento que permita comprobar a la autoridad ambiental, a la comunidad y al dueño del proyecto el cumplimiento o no de los estándares establecidos en la normativa ambiental vigente.

## 9.5 Programa de control y monitoreo ambiental

El establecimiento de sistemas de monitoreo ambiental en un sitio donde se ha realizado el cierre técnico debe ser un instrumento de vigilancia de las condiciones que pueden afectar a la salud pública o al medio ambiente. Su aplicación y alcance dependerá de la gravedad de impactos identificados y de la magnitud del botadero objeto del cierre.

## 9.6 Monitoreo de lixiviados, gases, contaminación de aguas subterráneas, superficiales<sup>32</sup>

Los sistemas de control y monitoreo de biogás, lixiviados y contaminación de aguas superficiales y subterráneas requieren de atención continua, lo mismo que el sistema de drenaje pluvial y el control de la erosión, el período de post clausura podría comprender un tiempo de 15 a 20 años.

Cuadro 9.2: Parámetros a Monitorear en la Etapa de Post Clausura de un Relleno Sanitario			
Factor a Monitorear	Frecuencia	Parámetros a Monitorear	Límites Permisibles
Lixiviados	Semestral	pH DQO, DBO OD: Oxígeno Disuelto Metales Pesados Conductividad Eléctrica Amoniaco Nitratos Nitritos	No se cuenta límites permisibles de acuerdo a norma vigente
Gases	Bimensual	Composición de Biogás: CH <sub>4</sub> , O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	No se cuenta límites permisibles de acuerdo a norma vigente
Contaminación aguas superficiales	Semestral	pH DQO, DBO OD: Oxígeno Disuelto Metales Pesados Conductividad Eléctrica Amoniaco Nitratos Nitritos	Límites del RMCH
Contaminación aguas subterráneas	Semestral	pH DQO, DBO OD: Oxígeno Disuelto Metales Pesados Conductividad Eléctrica Amoniaco Nitratos Nitritos	Límites del RMCH

\* **RMCH:** Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica

**Fuente:** Elaborado en Base a Norma Boliviana NB 760-Requisitos Para el Diseño, Construcción, Operación y Monitoreo de un Relleno Sanitario

<sup>32</sup> Ídem

Físicos	Constituyentes Orgánicos	Constituyentes Inorgánicos	Biológicos
Aspecto	Químicos Orgánicos	Sólidos en suspensión (SS) Sólidos totales disueltos (STD)	Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
pH	Fenoles	Sólidos volátiles en suspensión (SVS)	Bacterias coliformes (Total fecal)
Potencial de reducción de oxidación	Demanda química de oxígeno (DQO)	Sulfatos	Placas estándar
Conductividad	Carbono orgánico (COT)	Fosfatos	
Color	Ácidos volátiles	Alcalinidad y acidez	
Turbiedad	Taninos, ligninas	N-Nitrito	
Olor	Solubles en éter (aceites y grasas)	N-Nitrato	

### 9.6.1 Monitoreo de Biogás

Se debe elaborar un programa de monitoreo de biogás que especifique los parámetros a determinar, así como la frecuencia de muestreo de acuerdo del siguiente detalle:

Parámetro	Equipo	Técnica	Frecuencia
Composición del biogás: CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	Cromatografía de gases	Cromatografía de gases	Bimestral
Explosividad y toxicidad	Exposímetro digital	Lectura directa en campo	Mensual
Flujo	Flujo metro	Lectura directa en campo	Mensual

**Fuente:** Elaborado en Base a Norma Boliviana NB 760-Requisitos Para el Diseño, Construcción, Operación y Monitoreo de un Relleno Sanitario

El nivel de generación de biogás al inicio del periodo de mantenimiento, será uno de los más elevados. La cantidad irá en descenso a lo largo del tiempo.

### 9.6.2 Monitoreo del Aire

Se considera realizar mediciones mensuales los dos primeros años después del cierre técnico del sitio, posteriormente el control anual será suficiente.

Para el programa de monitoreo de partículas aerotransportables se debe tomar en cuenta las especificaciones detalladas a continuación:

Cuadro 9.5: Monitoreo del Aire			
Parámetro	Equipo	Técnica	Frecuencia
Partículas totales en suspensión	Equipo para alto volumen	Muestreo de alto volumen	Mensuales
Partículas biológicas viables	Equipo de laboratorio para medición de colonias de bacterias en el aire	Incubación, conteo de colonias	Mensuales
Ruido	Sonómetro	Según el manual	Mensuales

### 9.6.3 Monitoreo del suelo

El monitoreo está encaminado a la detección de metales pesados y compuestos orgánicos volátiles. Solo se realizarán cuando se tenga sospecha de contaminación y a modo de comprobación.

Cuadro 9.6: Monitoreo del Suelo	
Parámetro	Frecuencia
Metales pesados (Sb, As, Ba, Be, Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Ni, Se, Ag, Tl, V, Zn)	En caso de sospechar su presencia
Compuestos orgánicos volátiles o semivolátiles.	En caso de sospechar su presencia.

## 9.7 Uso final del sitio

Luego de efectivizar el cierre técnico del relleno sanitario, se debe esperar un tiempo prudente para que se establezcan la generación de lixiviados o gases aproximadamente entre 10 a 15 años para destinar el sitio para un nuevo uso. Es decir, se deberá tener certeza de la estabilización efectiva de los residuos y la no generación de biogás y lixiviados. De todas formas, las actividades a implementar para el uso final del suelo deben considerar:

-  Iniciativas que garanticen la no erosión de la cubierta final a fin de garantizar la no infiltración del agua de lluvia.
-  Iniciativas que no comprometan la estabilidad de la masa de residuos. No se debe permitir la construcción de edificaciones, viviendas, escuelas ni infraestructura pesada sobre la superficie del relleno, debido a su poca capacidad para soportar estructuras pesadas, además de los problemas que pueden ocasionar los hundimientos y la generación de gases.

El uso futuro de un relleno sanitario depende del clima, de su localización respecto al área urbana, de su extensión y de la configuración final del relleno, la altura y el grado de compactación, así como también de la capacidad económica para hacer frente a la conversión del área.

El terreno de un relleno sanitario cerrado se presta para desarrollar programas de recuperación paisajística y social como un parque, un campo deportivo o una zona verde.

## BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

1. Guía Ambiental de Rellenos Sanitarios, Ministerio del Ambiente, Colombia, 2002.
2. Relleno Sanitario para Grandes Conglomerados Urbanos, Sued J, Mennella, OPS/HPE/CEPIS, 1984
3. Manual para la Supervisión y Control de Rellenos Sanitarios, Wehenpohl Günther GTZ México, 2000.
4. Guía Básica para el Manejo Ambiental de Rellenos Sanitarios, Programa Nacional de Competitividad, Costa Rica.
5. Sistema de Tratamiento de Lixiviado Relleno Sanitario, Ingeniería Ambiental; 2ed, Henry, J. G.; Heinke, Gary. W. Editorial Pearson. 1996.
6. Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos, Fernández A, Sánchez O, ONUDI – LARE, 1997.
7. Guía para la Gestión del Manejo de Residuos Sólidos Municipales, Salazar D, PROARCA/SIGMA Argentina, 2004.
8. Guía Práctica para la Operación de Celdas Diarias en Relleno Sanitarios Pequeños y Medios, Meléndez C., PROARCA/SIGMA Argentina, 2004.
9. Guía de Diseño, Construcción, Operación, Mantenimiento y Cierre de Relleno Sanitario Manual, Sandoval Leandro, Ministerio del Ambiente, Perú, 2009.
10. Guía de Diseño, Construcción, Operación, Mantenimiento y Cierre de Relleno Sanitario Mecanizado, Sandoval Leandro, Ministerio del Ambiente, Perú, 2009.
11. Guía para el Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios Manuales, Jaramillo Jorge, Universidad de Antioquía, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Colombia, 2002.
12. Diseño y operación de Rellenos Sanitarios, Collazos Héctor, Escuela Colombiana de Ingeniería, 3ra Edición, Colombia, 2008.
13. Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios Municipales, Eva Röben, DED/, Loja Ecuador, 2002.
14. Manual de Operación de Relleno Sanitario, Secretaria de Desarrollo Social, México, 2005
15. Guía Metodológica para la formulación de Planes Sectoriales de Desarrollo, Viceministerio de Planificación y Coordinación, Bolivia, 2009.
16. Tratamiento y Gestión de Residuos Sólidos, Colomer F., Gallardo Antonio, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2007
17. Rellenos Sanitarios para Poblaciones Menores a 10.000 habitantes, Cooperación Danesa, Bolivia, 2008.
18. Normas Bolivianas NB 757 – NB 760, Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, IBNORCA, Bolivia, 1996.
19. Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos en Bolivia, Ministerio de Medio Ambiente y Agua, Bolivia, 2011.
20. Programa Plurinacional de la Gestión Integral de Residuos Sólidos, Ministerio de Medio y Agua, Bolivia, 2011.
21. Informe III, Planes de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos, Ingeniería Básica, Evaluación de Impacto Ambiental, BID, Consorcio de Gestión Integral, Bolivia, 2012
22. Cierre técnico del relleno de Serrallarga, Lleida; Catalunya, España. Agència de Residus de Catalunya
23. Decreto 7/1997 de enero, sobre la disposición de los desperdicios de los residuos en depósitos controlados. Catalunya. Agència de Residus de Catalunya
24. Real Decreto 1481/2001 de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero. España

# **ANEXO 1**

## **CÁLCULO DE LA GENERACIÓN DE LIXIVIADO POR EL MÉTODO SUIZO**



## ANEXO 1

### Cálculo de la generación de lixiviado por el Método Suizo

#### Datos de Partida:

**Área (A) = 5 hectáreas (50000 m<sup>2</sup>)** → Área estimada con residuos sólidos en la Vida Útil del Relleno Sanitario.

**Precipitación media anual (P) = 500 mm/año** → Dato de estación meteorológica más cercana al Municipio.

**Tiempo (t) =** Numero de segundos en un año. (31.536.000 s/año)

**k =** Coeficiente que depende del grado de compactación de los residuos sólidos, cuyos valores recomendados son los siguientes en (m/mm):

K (coeficiente)	Tipo de Relleno Sanitario
0.25 a 0.50	Rellenos Manuales
0.15 a 0.25	Relleno Mecanizados

Tomaremos 0.35 por tratarse de un relleno que no cuenta con una buena compactación de los residuos.

#### Caudal de Lixiviados a Generarse en un Año (Q) = 1/t PxAxK

$$Q [\text{lt/seg}] = 500 \times 50.000 \times \left( \frac{0.35}{31.536.000} \right) = 0.277 [\text{lt/seg}]$$

$$Q [\text{m}^3/\text{mes}] = 0.277 \times \left( \frac{2.678.400 \text{segundos}}{\text{mes}} \right) \times \left( \frac{1 \text{m}^3}{1000 \text{litros}} \right) = 742 [\text{m}^3/\text{mes}]$$

### Cálculo de la generación de lixiviado debido a la humedad de los residuos sólidos

Si consideramos un municipio con una generación de 36.500 Ton/año de residuos sólidos, el lixiviado se podrá calcular de la siguiente forma:

En un relleno semi mecanizado se llegara a una compactación de los residuos en el primer año de 0.7 Ton/m<sup>3</sup> y concluirá su compactación a los 5 años con 0.9 Ton/m<sup>3</sup>.

Al momento de disponer los residuos en el área de relleno se produce una diferencia del porcentaje de humedad, lo que corresponde al líquido liberado producto de la capacidad de compactación que experimentan los residuos, de los cuales el 40% de ellos percola, mientras que el otro 60% se recupera en el esponjamiento de los residuos y es utilizado en su degradación. Con este criterio se espera que en cinco años de compactación se llegue a una densidad de 0,9 Ton/m<sup>3</sup>, y a una humedad de 20%, con la aplicación del siguiente cuadro se determinará el volumen de lixiviado que se generara por la humedad de los residuos.

Residuos para el año 1	Periodo De descomposición en 5 años	Cantidad Ton/Año	Densidad de los Residuos D	Volumen Residuos Sólidos V	% de Humedad Inicial HI	% de Humedad Final HF	Diferencia de Humedades H (HI-HF)	Volumen de Líquido liberado por los Residuos VL= (V*H)	Volumen que Percola como Lixiviado VLP=VL*40%
	1	36500	0.7	52143	0.45	0.35	0.10	5214	2086
	2	36500	0.75	48667	0.35	0.25	0.10	4867	1947
	3	36500	0.8	45625	0.25	0.22	0.03	1369	548
	4	36500	0.85	42941	0.22	0.21	0.01	429	172
	5	36500	0.9	40556	0.21	0.20	0.01	406	162

Como se puede apreciar en el cuadro anterior los residuos sólidos que se depositen en el relleno sanitario en el primer año de vida generaran una cantidad de lixiviado al concluir dicho periodo, después el segundo año y así sucesivamente hasta que el quinto año su generación será mínima, con este concepto básico y practico se puede desarrollar la siguiente tabla que establece la generación de lixiviado de acuerdo a los años de funcionamiento del relleno sanitario.

Generación de Lixiviados en m <sup>3</sup> /año	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9
Lixiviado de los residuos del Primer Año	2086	1947	548	172	162				
Lixiviado de los residuos del Segundo Año		2086	1947	548	172	162			
Lixiviado de los residuos del Tercer Año			2086	1947	548	172	162		
Lixiviado de los residuos del Cuarto Año				2086	1947	548	172	162	
Lixiviado de los residuos del Quinto Año					2086	1947	548	172	162
<b>Sumatoria de Lixiviados</b>	<b>2086</b>	<b>4033</b>	<b>4581</b>	<b>4753</b>	<b>4915</b>	<b>2829</b>	<b>882</b>	<b>334</b>	<b>162</b>

El valor crítico en la generación de lixiviados por la humedad de los residuos sólidos depositados en el relleno sanitario es hasta el quinto año de vida útil del mismo, por consiguiente el valor a tomar será el promedio de los 5 primeros años.

Promedio de Caudal de Lixiviado por humedad de residuos =  $(2.086+4.033+4.581+4.753+4.915)/5=4.074$  (m<sup>3</sup>/año)

O expresado en meses 339,5 (m<sup>3</sup>/mes)

Caudal de Lixiviado para el diseño del sistema de tratamiento y drenajes =  $742$  (m<sup>3</sup>/mes)+339.5 (m<sup>3</sup>/mes) = **1.081,5 (m<sup>3</sup>/mes)**

Este caudal deberá ser utilizado para definir y prever el área necesaria para la retención de estos lixiviados y el tratamiento más adecuado para el volumen esperado.



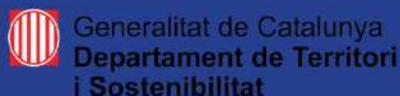
# ¡Alarga la vida útil de tu relleno reciclando y reutilizando tus residuos!!!



Viceministerio de Agua Potable y Saneamiento Básico  
Dirección General de Gestión Integral de Residuos Sólidos  
Calle Capitán Castrillo N° 434 Teléfonos: (591-2) 2116583 – 2115571 Fax: 2-116124  
[www.mmaya.gob.bo](http://www.mmaya.gob.bo)

Bolivia 2012

Esta publicación se realizó con el apoyo de:



GUÍA PARA EL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y CIERRE DE RELLENOS SANITARIOS