



**PROYECTO DE FORTALECIMIENTO DE LA CAPACIDAD INSTITUCIONAL
PARA LA GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS
EN LA REPÚBLICA DOMINICANA A NIVEL NACIONAL
FASE 2**

**MANUAL DE CONSTRUCCIÓN
SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL NUEVOS**

OCTUBRE 2023



MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

Este manual ha sido elaborado bajo el proyecto de Fortalecimiento de la Capacidad Institucional para la Gestión Integral de Los Residuos Sólidos en La República Dominicana a Nivel Nacional, Fase 2.

Viceministra de Gestión Ambiental

Indhira de Jesús

Director Programa para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos -PROGIRS-

John Grullón

Jefe de Equipo de Expertos de JICA

Akihiro Murayama

Coordinación Técnica

Maribel Chalas Guerrero, MMARN

Paula De León, Equipo de Expertos de JICA

Elaboración, Redacción y Revisión

Fumiyasu Nakada, Equipo de Expertos de JICA

Paula De León, Equipo de Expertos de JICA

Maribel Chalas, MMARN

Yvelisse Pérez, MMARN

Adrián Gañán, MMARN

Elvin López, LMD

Camilo Tapia, LMD

Edición y Diagramación

Jonathan de la Cruz Matías

Allan Pilarte Ferreira

Proyecto Financiado por:

Agencia de Cooperación Internacional de Japón – JICA-

República Dominicana, octubre 2023



MANUAL DE CONSTRUCCIÓN SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL NUEVOS

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
1. GENERALIDADES	13
1.1 Marco legal de la disposición final en la República Dominicana	13
1.2 Rol de las Instituciones en la Disposición Final en RD	15
1.3 Importancia de una disposición final adecuada	17
2. CONCEPTOS BÁSICOS	19
2.1 Rellenos sanitarios	19
2.1.1 Tipos de rellenos sanitarios	19
2.1.2 Celda y celda diaria	21
2.1.3 Métodos de vertido	22
2.1.4 ¿Qué ocurre con los residuos en un relleno sanitario?	24
2.2 Ventajas y desventajas de un relleno sanitario	26
2.2.1 Ventajas	26
2.2.2 Desventajas	27
3. PLANIFICACIÓN DE UN SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL	28
3.1 Proceso de aprobación y plan de desarrollo de un SDF Nuevo	29
3.2 Selección del sitio	31
3.2.1 Consideraciones para la selección del sitio	31
3.2.1.1 Metodología de evaluación	31
3.2.1.2 Criterios de Evaluación	32
3.2.2 Levantamiento de la situación actual del sitio: Estudios Previos	35
3.2.3 Necesidad de crear consenso público	38
4. DISEÑO BÁSICO DE UN RELLENO SANITARIO	40
4.1 Cálculos preliminares para el diseño de un relleno sanitario	40
4.2 Proyección de la generación per cápita y total	40
4.3 Tipo de residuos, composición y características	42

4.4 Capacidad requerida	42
4.4.1 Paso 1: Cálculo de la cantidad (peso) de residuos generados/año	42
4.4.2 Paso 2: Cálculo del volumen (m ³) de residuos a depositar	43
4.4.3 Paso 3: Cálculo de la capacidad volumétrica	43
4.4.4 Paso 4: Cálculo del área total requerida para el SDF	44
5. DISEÑO DETALLADO DE UN RELLENO SANITARIO	47
5.1 Nivel de construcción para sitios de disposición final nuevos	48
5.2 Elevación mínima de la parte inferior del SDF	50
5.3 Vida útil del relleno sanitario	50
5.4 Diseño de las instalaciones principales	51
5.4.1 Instalación de control y pesaje de vehículos entrantes	51
5.4.1.1 Selección de la báscula y número de básculas a instalar	52
5.4.2 Instalación de puerta de acceso y verja perimetral	52
5.4.3 Instalación de un letrero o cartel de señalización	53
5.4.4 Diseño de las celdas para depósito de los residuos	53
5.4.5 Diseño del muro de contención o banquina	57
5.4.5.1 Tipo de estructuras de contención	58
5.4.6 Diseño de instalaciones para recolección y drenaje de aguas pluviales	60
5.4.6.1 Cálculos requeridos	62
5.4.7 Diseño de las instalaciones para recolección, drenaje y tratamiento de lixiviados	67
5.4.7.1 Diseño del sistema para recolección y drenaje de lixiviados	69
5.4.7.2 Diseño del sistema de tratamiento de lixiviados	73
5.4.7.3 Cálculo de la Laguna de Lixiviados	76
5.4.8 Diseño del revestimiento e impermeabilización	77
5.4.9 Diseño de las instalaciones para ventilación de gases	79
5.4.9.1 Consideraciones para la instalación de tuberías para venteo de gases	81
5.4.10 Consideraciones para el material de cobertura	82
5.5 Diseño de las instalaciones complementarias	83

5.5.1 Edificio de administración	84
5.5.1.1 Planificación del edificio administrativo	84
5.5.2 Caminos de acceso y vías de mantenimiento	85
5.5.3 Diseño de instalaciones de monitoreo ambiental	86
5.5.4 Instalación para lavado de vehículos	89
5.5.5 Otras consideraciones	89
5.5.5.1 Zona de Amortiguamiento	89
5.5.5.2 Instalación y suministro de equipos para la prevención de incendios	90
5.6 Estimación del costo del proyecto	90
6. INSTALACIÓN Y CONSTRUCCIÓN	92
6.1 Adquisición de fondos	92
6.2 Financiamiento por parte del Fideicomiso	92
6.2.1 Solicitud de aprobación	92
6.2.2 Desembolso	94
6.3 Financiamiento de los costos restantes	95
6.3.1 Presupuesto de desarrollo de los municipios	95
6.3.2 Préstamos	95
6.3.3 Tarifa por servicio de gestión de residuos	95
6.4 Proceso de gestión de compra o adquisición	96
6.5 Consideraciones durante la construcción	97
6.5.1 Inspección general de la construcción del relleno sanitario	97
6.5.2 Instalación del recubrimiento con geomembrana	97
6.5.3 Instalación del sistema de recolección del lixiviado	98
7. FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	99

TABLAS DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de ubicación de los SDF existentes en RD según Levantamiento 2021.	12
Figura 2: Problemas en los vertederos a cielo abierto.	18
Figura 3: Diagramas estructurales del método Fukuoka y del método anaeróbico para rellenos sanitarios.	21
Figura 4: Explotación de un relleno sanitario y conformación típica de una celda.	22
Figura 5: Vertido por el Método de Trinchera.	22
Figura 6: Conformación de la celda por el Método de Área	23
Figura 7: Conformación de una celda por el método combinado.	24
Figura 8: Composición típica del biogás.	25
Figura 9: Flujo del desarrollo de un proyecto de SDF (ejemplo).	28
Figura 10: Flujo del procedimiento de aprobación para desarrollo del nuevo SDF.	30
Figura 11: Ejemplo de mapa topográfico de área amplia.	36
Figura 12: Esquema condiciones climatológicas e hidrológicas favorables.	36
Figura 13: Indicadores objetivos frente a los subjetivos.	38
Figura 14: Relleno sanitario con Nivel 4 de construcción.	50
Figura 15: Distribución área de entrada del SDF.	52
Figura 16: Esquema de una verja típica con malla ciclónica.	53
Figura 17: Portón de acceso vehicular típico de un SDF.	53
Figura 18: Elementos de una celda.	55
Figura 19: Esquema del muro de contención o banquetas tipo terraza.	57
Figura 20: Principales tipos de estructuras de contención.	58
Figura 21: Ejemplo conformación recomendada de los niveles o terrazas.	59
Figura 22: Instalación de banquina en área de residuos (izquierda) y banquina en la base (derecha).	59
Figura 23: Detalle de la sección típica de la zanja de drenaje.	60
Figura 24: Diagrama conceptual instalaciones de recolección y drenaje de aguas pluviales.	61

Figura 25: Ejemplo de establecimiento de un área de captación.	63
Figura 26: Modelo sección transversal para el drenaje pluvial.	66
Figura 27: Diagrama estructural del Método Fukuoka (semi-aeróbico) para áreas de disposición final de desechos (creado por la Prefectura de Fukuoka).	67
Figura 28: Concepto de instalación de recolección de lixiviados.	69
Figura 29: Planos de disposición de la tubería inferior.	70
Figura 30: Ejemplo estructural de una tubería inferior.	71
Figura 31: Ejemplo estructural de una tubería vertical.	71
Figura 32: Tubería para drenaje de lixiviados en la celda.	73
Figura 33: Sección transversal de una laguna de lixiviados.	75
Figura 34: Imagen de una laguna de lixiviados.	77
Figura 35: Esquema del Sistema de impermeabilización requerido en cada celda.	78
Figura 36: Dibujo Conceptual instalaciones para ventilación de gases.	80
Figura 37: Ejemplo de una instalación sencilla para ventilación de gases.	80
Figura 38: Ejemplo de la estructura de conexión.	81
Figura 39: Esquema de la cobertura diaria e intermedia (Izquierda) y cobertura final (derecha).	83
Figura 40: Esquema de una sección transversal un camino de acceso.	85
Figura 41: Secciones típicas para los caminos de acceso y vías de mantenimiento.	86
Figura 42: Detalle de un pozo de monitoreo de aguas subterráneas común o piezómetro.	88
Figura 43: Procedimiento de estimación de costos.	91
Figura 44: Flujo básico de aplicación al Fideicomiso para desembolso.	93
Figura 45: Flujo del procedimiento de orden de construcción.	96

TABLAS

Tabla 1: Elementos a incluir en el plan de desarrollo de un SDF Nuevo.	30
Tabla 2: Criterios para el análisis de alternativas de ubicación para un relleno sanitario de la Mancomunidad de Ayuntamientos del Gran Santo Domingo.	34
Tabla 3: Densidad de los residuos sólidos.	43
Tabla 4: Instalaciones a ser implementadas en SDF nuevos.	49
Tabla 5: Coeficiente de flujo o escurrimiento por proporción de área urbana.	63
Tabla 6: Coeficiente de flujo o escurrimiento por uso del suelo.	63
Tabla 7: Coeficiente de rugosidad de Manning.	67
Tabla 8: Tipos de tratamiento de lixiviados.	74
Tabla 9: Estimación de la renta media disponible de los hogares y de la capacidad de pago (2021).	95
Tabla 10: Construcción general de rellenos - Puntos críticos de la inspección.	97

TABLA DE FOTOS

Foto 1: Relleno Sanitario Tarapoto, Perú.	19
Foto 2: Relleno Sanitario Moyobamba, Perú.	47
Foto 3: Báscula Puente relleno sanitario ASINORLU con registro de peso computarizado, El Salvador.	52
Foto 4: Proceso de instalación de un dique de terraplén para una celda.	58
Foto 5: Laguna de lixiviados en el Relleno Sanitario de ASINORLU, Santa Rosa de Lima, El Salvador.	76
Foto 6: Instalación tubería para ventilación de gases Relleno Sanitario Moyobamba, Perú.	81
Foto 7: Edificio administrativo relleno sanitario Tarapoto, Perú	84

Glosario de abreviaturas y acrónimos

ADN	Ayuntamiento del Distrito Nacional
APP	Alianza Pública-Privada
CAS	Consideraciones Ambientales y Sociales
DIA	Declaración de Impacto Ambiental
ET	Estación de Transferencia
E/F	Estudio de Factibilidad
FEDOMU	Federación Dominicana de Municipios
FOCIGIRS	Proyecto de Fortalecimiento de la Capacidad Institucional para la gestión Integral de los Residuos sólidos
GIS	Sistema de Información Geográfica
GIRS	Gestión Integral de residuos sólidos
GPC	Generación per Cápita
LMD	Liga Municipal Dominicana
MEPyD	Ministerio de Economía Planificación y Desarrollo
MMARN	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
MIREX	Ministerio de Relaciones Exteriores
MIRS	Manejo Integral de los residuos sólidos
MRS	Manejo de Residuos Sólidos
OPS	Organización Panamericana de la Salud
ONAMET	Oficina Nacional de Meteorología
PO	Plan de Operaciones
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente
PROGIRS	Programa para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos del MMARN
RD	República Dominicana
RS	Residuos sólidos
RSM	Residuos sólidos municipales
RSU	Residuos sólidos urbanos
SINGIR	Sistema Nacional para la Gestión Integral de los Residuos
SDF	Sitio de Disposición Final
SDFN	Sitio de Disposición Final Nuevo

INTRODUCCIÓN



En la República Dominicana, la mayoría de los sitios de disposición final (SDF) son vertederos a cielo abierto operados de manera inadecuada. Esta situación provoca problemas ambientales y sociales. El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MMARN) ha comenzado a establecer los instrumentos regulatorios relacionados directamente con la gestión de los residuos sólidos, luego de promulgada, en el año 2020, la Ley 225-20, primera ley específica en gestión de residuos sólidos. En el año 2021 se promulgó el Reglamento 320-21, Reglamento General para la aplicación de la Ley 255-20. Además, también en el 2021, MMARN emitió la Resolución 0036-2021 sobre el Plan de Regularización de SDF Existentes.

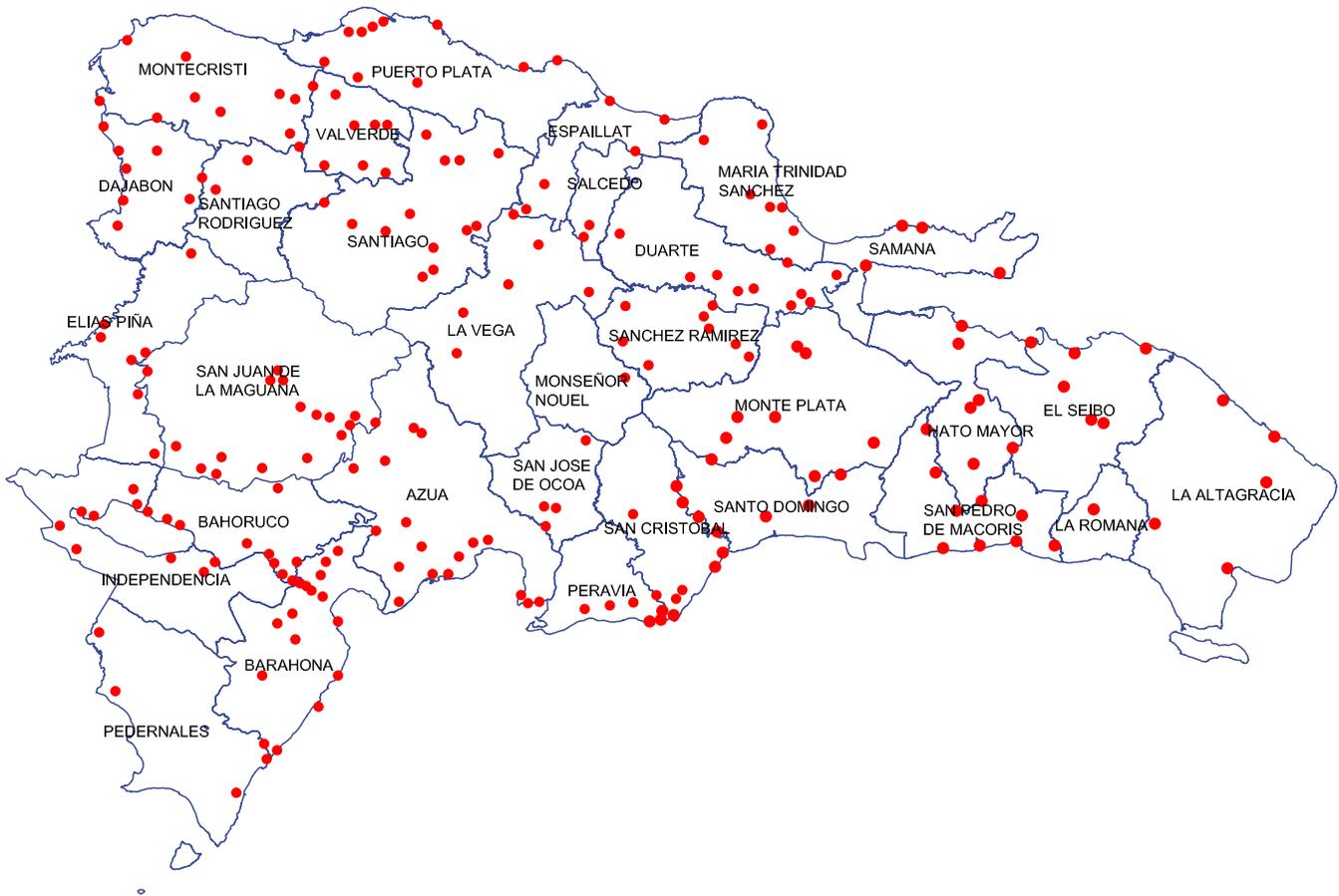
Bajo el escenario anterior, es necesaria la inclusión de manuales técnicos que especifiquen los requerimientos bajo los cuales los promotores y operadores de los SDF, ya sea el gobierno local y/o una empresa privada, puedan llevar a cabo la construcción, operación, rehabilitación o cierre adecuados para los SDF existentes.

Con la finalidad de proveer una herramienta de apoyo para la planificación, diseño, construcción y operación de sitios de disposición final que cumplan con los requisitos establecidos en la Ley 225-20 y sus instrumentos regulatorios derivados, así como el cierre y la rehabilitación de los vertederos a cielo abierto existentes, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales se complace en poner este documento en manos de las alcaldías y demás instituciones del país, responsables directas del manejo de los residuos sólidos, a fin de contribuir a la creación de las capacidades necesarias y, de esta manera, aunar esfuerzos decisivos para transformar la situación de uno de los más graves problemas ambientales que tiene hoy la República Dominicana.

En el año 2021, con el apoyo de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MMARN) realizó el levantamiento nacional sobre la situación actual de los sitios de disposición final existentes (SDF) en la República Dominicana. Según los resultados de la encuesta, se confirmaron 240 SDF en 158 municipios (incluido el Distrito Nacional) y 235 Distritos Municipales (DM), de los cuales 226 SDF son vertederos a cielo abierto. La mayoría de los SDF existentes en la República Dominicana requieren un cierre o rehabilitación para cumplir con la legislación.

De esos 240 SDF identificados, alrededor del 85% son gestionados de forma independiente o conjunta por menos de 2 Municipios/DM y operan con importantes deficiencias.

Por citar algunos de los problemas encontrados, hay pocos SDF implementando medidas contra los gases generados por los residuos y los lixiviados, y muchos municipios confirmaron que reciben constantes quejas de la comunidad por la existencia de humo y malos olores en sus SDF.



Fuente: Equipo de expertos de JICA

Figura 1: Mapa de ubicación de los SDF existentes en RD según Levantamiento 2021.-

La experiencia en las pocas instalaciones de los SDF operados en el país que hasta la fecha han intentado responder a los requerimientos de un relleno sanitario, tanto en términos de infraestructura como en su operación (si es que puede decirse que existe uno en el pleno sentido del término), no ha sido satisfactoria; dejando claro que sólo a través de una planificación, diseño detallado y una correcta construcción seguido de una operación adecuada, utilizando tecnologías apropiadas al medio ambiente y tomando en cuenta las condiciones socioculturales, se podrá responder a la obligatoria necesidad de disponer adecuadamente los residuos sólidos urbanos, sobre todo los no aprovechables.

La elaboración de este manual se ha basado en la investigación y recopilación de especificaciones técnicas y buenas prácticas en el desarrollo de SDF para los residuos sólidos de otros países, citando algunos como, Japón, Perú, México, Colombia, Bolivia y Ecuador.

El objetivo primordial del manual es establecer, mediante requisitos técnicos y operativos sobre residuos y vertidos, medidas, procedimientos y orientaciones para impedir o reducir, en la medida de lo posible, los efectos negativos en el medio ambiente que puedan provocar las infraestructuras que se desarrollen en lo adelante para la disposición de los residuos sólidos en la República Dominicana.

1. GENERALIDADES

1.1 Marco legal de la disposición final en la República Dominicana

La República Dominicana cuenta con un amplio marco legal y jurídico relacionado, sea de forma directa o indirecta, con la disposición final de los residuos sólidos urbanos, tal y como definidos en la nueva Ley General de Gestión Integral y Coprocesamiento de Residuos Sólidos; abarcando desde la Constitución hasta la Política de Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales¹.

(1) La Constitución de la República Dominicana

El Art. 66, en su párrafo 2, establece la protección del medio ambiente como un derecho colectivo; en tanto que Art. 67, indica que el Estado tiene el deber de "prevenir la contaminación, proteger y mantener el medio ambiente en beneficio de las generaciones presentes y futuras", al mismo tiempo que consagra el derecho de todos a "vivir en un medio ambiente sano". Este artículo aplica ampliamente a la disposición final, ya que los vertederos a cielo abierto afectan la calidad del aire, del suelo/subsuelo y de los cursos superficiales de agua.

(2) Estrategia Nacional de Desarrollo (Ley 1-12)

El cuarto eje estratégico tiene como objetivo general el manejo sostenible del medio ambiente, encontrándose entre los objetivos específicos, el No. 4.1.3 que indica: desarrollar una gestión integral de desechos, sustancias contaminantes y fuentes de contaminación. Concretamente en el tema que nos ocupa la línea de acción No. 4.1.3.2 señala: Ampliar la cobertura de los servicios de recolección de residuos sólidos, asegurando un manejo sostenible de la disposición final de los mismos y establecer regulaciones para el control de vertidos a las fuentes de agua.

(3) Ley General de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Ley 64-00)

Promulgada el 18 de agosto del año 2000, el Art. 15 establece los objetivos particulares de la Ley, entre los cuales el acápite (7) indica: Propiciar un medio ambiente sano que contribuya al sostenimiento de la salud y prevención de las enfermedades. Una disposición final correcta a largo plazo es un pilar para el logro de este objetivo.

(4) Ley General de Gestión Integral y Coprocesamiento de Residuos Sólidos (Ley 225-20)

Esta Ley, promulgada en octubre del 2020, constituye un gran logro para el país, luego de alrededor de 10 años de que el primer proyecto fuera introducido al Congreso. Tiene como objetivo prevenir la generación de residuos, así como establecer un régimen jurídico en la gestión integral para fomentar la reducción, reutilización, reciclaje, aprovechamiento y valorización, así como regular los sistemas de recolección, transporte, barrido; sitios de disposición final, estaciones de transferencia, centros de acopio, plantas de valorización, para garantizar el derecho de todos a vivir en un ambiente sano, protegiendo el bienestar de la población, así como reduciendo los "GEI" emitidos por los residuos.

1. La Ley 225-20 sustituye la terminología de residuos sólidos municipales por residuos sólidos urbanos.

Cabe destacar la creación en esta Ley de un mecanismo, el Fideicomiso para la Gestión integral de Residuos, para fortalecer la implementación de la GIRS en todas sus etapas y aspectos complementarios; incluyendo financiar el establecimiento de nuevas infraestructuras de manejo de residuos, entre las cuales los rellenos sanitarios; así como apoyar la sostenibilidad financiera durante la operación, asegurando un pago mínimo. Muy atado a este punto, la Ley establece la obligatoriedad del cobro, por parte del ayuntamiento o junta de distrito municipal (Art. 142), por el servicio completo de manejo de residuos que incluye recolección, transporte, transferencia y disposición final.

Dentro de la Ley 225-20, también se crea el **Sistema Nacional para la Gestión Integral de los Residuos -SINGIR-**, como un instrumento de gestión que propicia la coordinación interinstitucional y municipal, teniendo por objeto generar recomendaciones para la gestión integral de los residuos en los distintos ámbitos del gobierno, a efectos de lograr la homologación nacional en la gestión integral de los residuos, la cobertura total de los servicios, la disminución de riesgos y pasivos ambientales.

La Ley 225-20 ordena la preparación del **Plan Nacional de Gestión Integral de Residuos -PLANGIR-**, con el propósito de establecer un marco para las prioridades, lineamientos y metas que deberán incluir los **Planes Municipales para la Gestión Integral de Residuos -PMGIR-** y programas sectoriales. Asimismo, ordena la preparación del **Programa Nacional de Remediación y Rehabilitación de Sitios Contaminados**, que permitirá establecer las acciones inmediatas para mitigar la contaminación en los vertederos existentes.

(5) Ley de Planificación Urbana (Ley 6232).

La "oficina de planificación urbana" como órgano técnico, asesor y consultor dentro de los ayuntamientos, es responsable de la emisión de los permisos para la construcción, incluyendo obviamente la instalación de un relleno sanitario.

(6) Ley de Planificación e Inversión Pública (Ley 498-06).

Crea el Sistema Nacional de Planificación e Inversión Pública. Los ayuntamientos pueden formular proyectos de infraestructura para la disposición final de residuos sólidos urbanos y acogerse a financiamiento, a través de la inclusión de estas obras en el presupuesto nacional.

(7) Ley sobre el Distrito Nacional y los Municipios (Ley 176-07)

El artículo 19, en su apartado (f), ordena a los municipios "Regular y gestionar la protección de la higiene y el saneamiento público para garantizar el saneamiento ambiental". Mientras que el (m), ratifica la competencia de los municipios en los servicios de limpieza y ornato público, recolección, tratamiento y disposición final de residuos sólidos.

(8) Procedimiento de Evaluación Ambiental

Define categorías para procesos y/o instalaciones relativas al manejo de los residuos sólidos, según “el impacto ambiental potencial o bien el riesgo ambiental y/o a la introducción de modificaciones nocivas o notorias al paisaje y/o a los recursos culturales del patrimonio nacional”. Indica que las infraestructuras de disposición final de residuos sólidos para poblaciones de más de 100,000 habitantes-equivalentes caen en categoría A, en tanto que para poblaciones menores caen en categoría B.

(9) Norma para la Gestión Ambiental de los Residuos Sólidos No Peligrosos

Esta norma emitida en junio de 2003 y modificada en abril 2009, establece los lineamientos para la gestión de los residuos sólidos urbanos no peligrosos y especifica los requisitos sanitarios que deben cumplirse en el almacenamiento, la recolección, el transporte y la disposición final.



1.2 Rol de las Instituciones en la Disposición Final en RD

La responsabilidad del manejo integral de los residuos sólidos es interinstitucional y debe ser asumida por todos los integrantes de la sociedad. El generador es el responsable del manejo de los residuos desde su generación hasta su disposición final y las instituciones deben cumplir con el rol asignado por la Ley:

(1) Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales es el organismo rector de la gestión del medio ambiente, los ecosistemas y de los recursos naturales, para que cumpla con las atribuciones que de conformidad con la legislación ambiental en general corresponden al Estado, con el fin de alcanzar el desarrollo sostenible.

De conformidad con su objetivo y funciones, el MMARN es la autoridad rectora de la política nacional y la regulación de la gestión de residuos, así como de aplicación en materia de residuos, con potestad para regular, dirigir y controlar la aplicación de la Ley 225-20. Como se mencionó en el acápite anterior, dicha Ley también ordenó la creación del SINGIR y el MMARN asume la Secretaría del mismo.

(2) Fideicomiso para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos

Presidido por el MMARN, la Ley 225-20 ordena la creación de un Fideicomiso como herramienta financiera para operar y gestionar el fondo destinado a la gestión integral de residuos sólidos, a la operación de estaciones de transferencia, vertederos y rellenos sanitarios, así como el cierre de vertederos a cielo abierto y la remediación y rehabilitación de sitios contaminados, en virtud de lo establecido en dicha Ley. Su objetivo principal es gestionar adecuadamente los montos recaudados provenientes de la Contribución Especial para la Gestión de Residuos Sólidos, establecida en el mismo instrumento, y otros fondos provenientes de las tarifas en las estaciones de transferencia y vertederos. Este fideicomiso ha sido denominado desde el año 2021 como **DO Sostenible**.

(3) Ayuntamientos y Juntas de Distritos Municipales

Son responsables por la gestión de los residuos municipales, de la limpieza pública y la calidad ambiental de su jurisdicción. Es su responsabilidad establecer y aplicar en el ámbito de su demarcación, el Plan Municipal de Gestión Integral de Residuos (PMGIR), con la participación de representantes de los distintos sectores sociales, compatibilizando con las políticas de desarrollo local y nacional, así como de establecer un sistema de cobro por concepto del manejo de los residuos, entre otras responsabilidades.

(4) Liga Municipal Dominicana

La Ley instruye a este organismo, que agrupa los municipios y Juntas de Distritos Municipales del país, un rol de acompañamiento importante, conjuntamente con el MMARN, para la elaboración de los Planes municipales para la Gestión de los Residuos Sólidos, como miembro del Consejo del fideicomiso y en el establecimiento de las tasas de servicio, incluida la correspondiente por la disposición final de los residuos.



1.3 Importancia de una disposición final adecuada

La gestión de un SDF es una actividad muy compleja. Si bien la operación fundamental consistirá en recibir y disponer adecuadamente los residuos, existen otras actividades complementarias que contribuirán al buen funcionamiento del SDF. Para los fines de este manual, SDF se refiere a un relleno sanitario y su infraestructura complementaria para el tratamiento de los residuos.

Una operación controlada o adecuada, se refiere a una condición de operación y funcionamiento que cumpla con el reglamento técnico establecido para un SDF. En este manual se describe de manera sencilla, cómo cumplir con los siguientes requerimientos:

- Acceso controlado
- Vertido de residuos en el frente de trabajo del relleno
- Cobertura de suelo diaria o al menos 3 veces por semana
- Implementación de instalaciones para ventilación de gases
- Mantenimiento de los caminos o vías internas
- Instalación de un sistema de drenaje para las aguas pluviales.
- Instalación de un sistema de control de lixiviados
- Instalación de una verja perimetral y una puerta de acceso.
- Supervisión, Monitoreo y Seguimiento

La operación y el mantenimiento adecuado de un SDF son necesarios para:

- Evitar que el relleno sanitario se convierta en un vertedero a cielo abierto.
- Reducir los impactos negativos potenciales en aire, agua y suelo.
- Minimizar o eliminar los impactos hacia las propiedades adyacentes.
- Reducir los costos de operación (a largo plazo).
- Incrementar la capacidad volumétrica y ampliar al máximo la vida útil.
- Establecer y mantener buenas relaciones públicas.
- Reducir los conflictos con las instancias reguladoras o normativas.
- Reducir accidentes, demandas e indemnizaciones.
- Satisfacer las necesidades de disposición final de residuos sólidos de la región.

Además de las consecuencias directas de la gestión inadecuada de los residuos sólidos municipales, existen efectos indirectos, como la sobreexplotación de los recursos naturales. Los residuos están formados por recursos que en la mayoría de los casos son no renovables. Es por ello que la disposición final de los residuos que pueden volver a utilizarse como insumo en un ciclo productivo contribuye a un mayor consumo de recursos naturales vírgenes. En otro orden, la instalación de un sitio de disposición final de residuos ocasiona, en general, la pérdida de valor económico de las propiedades circundantes.



Fuente: Manual Disposición Final FOCIMIRS

Figura 2: Problemas en los vertederos a cielo abierto

No se puede dejar de mencionar, el problema social que representa la presencia de recicladores de base, popularmente conocidos como “buzos”, quienes realizan su labor en condiciones inhumanas, sin ningún tipo de protección personal ni social, expuestos a altos riesgos para su salud.

En resumen, el vertido incontrolado o a cielo abierto tiene múltiples efectos negativos en la salud humana e impactos ambientales, económicos, sociales, ecológicos y estéticos.

La disposición final es la última etapa en el manejo de los residuos sólidos municipales y comprende al conjunto de operaciones destinadas a lograr el depósito permanente de residuos sólidos. Idealmente deben destinarse a disposición final los productos de las fracciones de rechazo inevitables resultantes de los procesos de valorización de los mismos. No obstante, en la práctica, los residuos que se destinan a disposición final son aquellos que por diversas circunstancias no tienen valor económico alguno en el contexto en que se generan. La carencia de valor puede ser porque no pueden ser reutilizados, debido a que no pueden comercializarse los materiales recuperados o no existe la tecnología adecuada para su valorización.

El método de disposición final más utilizado para los residuos sólidos municipales es el relleno sanitario. Entonces cabe la pregunta: ¿Qué es y para qué sirve un relleno sanitario?

2. CONCEPTOS BÁSICOS

2.1 Rellenos sanitarios

La Ley 225-20 define al relleno sanitario como un método de disposición final que consiste en colocar los residuos en el sitio, compactar y cubrir los residuos sólidos urbanos, mediante técnicas de ingeniería, con lo cual se prevé y controla los impactos que puedan causar los líquidos y gases producidos por efecto de la descomposición de la materia orgánica, con el fin de evitar la contaminación del ambiente y proteger la salud de la población (Art. 4, numeral 30). Además, se puede decir que es el lugar donde se reciben diariamente los residuos, se esparcen, se compactan, se cubren; y donde se realiza el control ambiental (principalmente de gases, lixiviados y olores). También se realiza un control de estabilidad de la masa de residuos para evitar el deslizamiento.



Fuente: Equipo de expertos de JICA
Foto 1: Relleno Sanitario Tarapoto, Perú

El objetivo principal del relleno sanitario es conservar y proteger el medio ambiente en su área de influencia. Esta técnica busca evitar y/o minimizar los efectos derivados de un vertido no controlado como se señaló anteriormente. Conseguir estos objetivos requiere una serie de infraestructuras bien diseñadas, un equipamiento adecuado y una correcta operación.

2.1.1 Tipos de rellenos sanitarios

Hay diferentes tipos de rellenos; según el método de operación, estos pueden ser: manuales o mecanizados; según el proceso de descomposición elegido en el diseño, semiaeróbicos o anaeróbicos.

(1) Rellenos sanitarios manuales:

La Ley 225-20 define los rellenos sanitarios manuales como aquellos que reciben la generación de residuos sólidos urbanos equivalente a una población de hasta 15.000 habitantes. Es una solución adecuada para comunidades pequeñas, para los municipios/distritos municipales situados en lugares aislados y/o con recursos económicos muy limitados. Aunque es una opción establecida en la referida Ley, su implementación está restringida y requiere una evaluación y aprobación especial por parte del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, ya que la disposición general es que los nuevos rellenos sanitarios solo se autorizarán para 3 o más municipios y/distritos municipales.

Para los fines de este Manual, cuando se indica el término “relleno manual” se refiere a la operación con equipos mecánicos livianos.

(2) Rellenos sanitarios mecanizados:

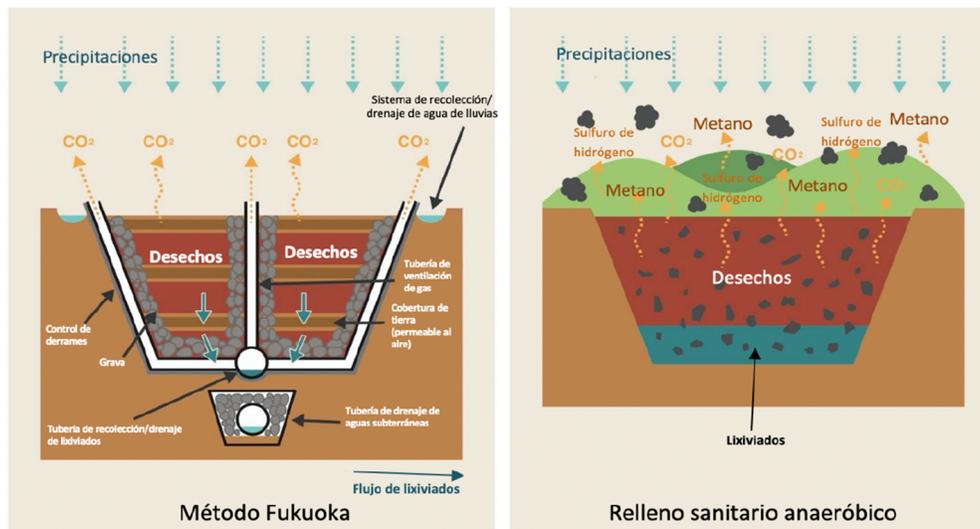
La Ley 225-20 indica que son aquellos que reciben la generación de residuos sólidos urbanos equivalente a una población mayor de 15.000 habitantes. A diferencia de los rellenos sanitarios manuales, la compactación mecanizada, tiene su aplicación en municipios medianos y grandes que, por la cantidad generada, no podrían ser manejados en su totalidad, y por lo tanto requieren el uso de maquinaria para la realización de las operaciones básicas: esparcimiento, compactación y cobertura de los residuos, así como para las excavaciones y transporte necesarios para el suministro de material de cobertura.

Como mencionado anteriormente, las operaciones pueden ser manuales o mecanizadas, pero el uso de equipos mecánicos, por su eficiencia en cuanto a la rapidez en la ejecución de las tareas y a los resultados obtenidos, han hecho que su uso sea prácticamente imprescindible, ya sea diariamente o algunas veces por semana en un SDF. El uso de estos equipos difícilmente pueda compararse con el uso de las herramientas manuales. En el manual de Operación de SDF se recomienda que, si el operador del SDF no puede adquirir equipos propios, al menos planifique la renta de un equipo que le permita ejecutar las operaciones básicas una vez por semana como mínimo.

(3) Rellenos sanitarios semiaeróbicos y anaeróbicos

La clasificación de rellenos sanitarios semiaeróbicos y anaeróbicos se debe a la presencia de oxígeno en el proceso de descomposición de los residuos orgánicos una vez depositados, compactados y cubiertos; dando lugar a una composición diferente en el biogás resultante de dicho proceso.

En el primer caso, los rellenos sanitarios semiaeróbicos, se crean las condiciones para la entrada de oxígeno en la masa de residuos y, por tanto, el gas resultante estará formado principalmente por dióxido de carbono. Este método fue desarrollado por los japoneses y se conoce como el método Fukuoka. Esto se logra conectando la tubería de recolección del lixiviado, ubicada en el fondo del relleno, con la tubería de ventilación del gas, como se observa en la Figura 3.



Fuente: Guía de Introducción al Método Fukuoka, Prefectura de Fukuoka, Japón

Figura 3: Diagramas estructurales del método Fukuoka y del método anaeróbico para rellenos sanitarios. -

El método Fukuoka consiste en un área para la disposición final de residuos que incluye los siguientes sistemas: ventilación de gas, recolección y descarga de lixiviados, tratamiento de lixiviados, recolección y drenaje de aguas de lluvia; y recolección y descarga de aguas subterráneas. En este método, el sistema de recolección y descarga de lixiviados-que consiste en grava y tuberías perforadas-se instala en la parte baja del relleno sanitario de tal manera que los lixiviados sean drenados rápidamente hacia el sistema de tratamiento de lixiviados donde se da la convección térmica gracias a la temperatura de fermentación generada por la descomposición de los residuos entre las capas.

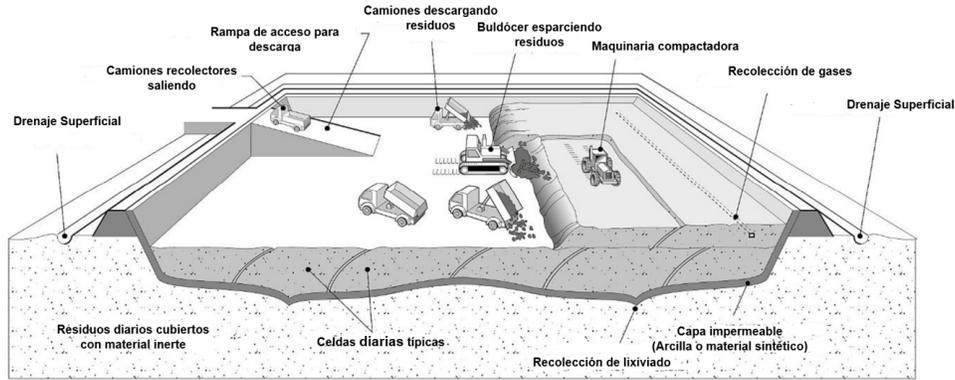
El diseño reduce el contenido de la humedad dentro de las capas, con suministro de aire natural desde las tuberías de recolección y descarga de lixiviados, lo cual promueve la descomposición de los residuos mientras mantiene el interior en un estado aeróbico.

En otras palabras, esta técnica, comparada con un método convencional anaeróbico para rellenos sanitarios, mejora la calidad del agua del lixiviado, elimina emisiones de gases de efecto invernadero, reduce la cantidad de hidrógeno sulfurado, así como de compuestos orgánicos volátiles generados y permite una temprana estabilización de los rellenos sanitarios.

Los vertederos anaeróbicos deben emplearse en proyectos que incluyan la recuperación del gas metano, en tanto que, los vertederos semiaeróbicos se recomiendan para el desarrollo de SDF en general.

2.1.2 Celda y celda diaria

Se llama “celda” (en algunos países “fosa”) a la conformación adecuadamente preparada que, en una porción de terreno, con acondicionamiento previo, se da a los residuos sólidos junto al material de cobertura debidamente compactados. La celda es la infraestructura principal de un relleno sanitario. Internamente, la celda estará compuesta por “celdas diarias” que no son más que un espacio específicamente definido dentro de la celda, en el cual se confinan, compactan y cubren los residuos durante cada día que dure la operación. El conjunto de celdas diarias adyacentes de la misma altura, formarán un nivel o terraza (denominada capa en algunos países).



Fuente: Tchobanoglous G., Theisen H & Vigil S.A. (1999) Integrated Solid Waste Management. McGraw Hill International. Universidad de Sevilla
 Trabajo fin de grado: Generación de lixiviados en vertederos. Teresa Jiménez González. (Traducción del JET)

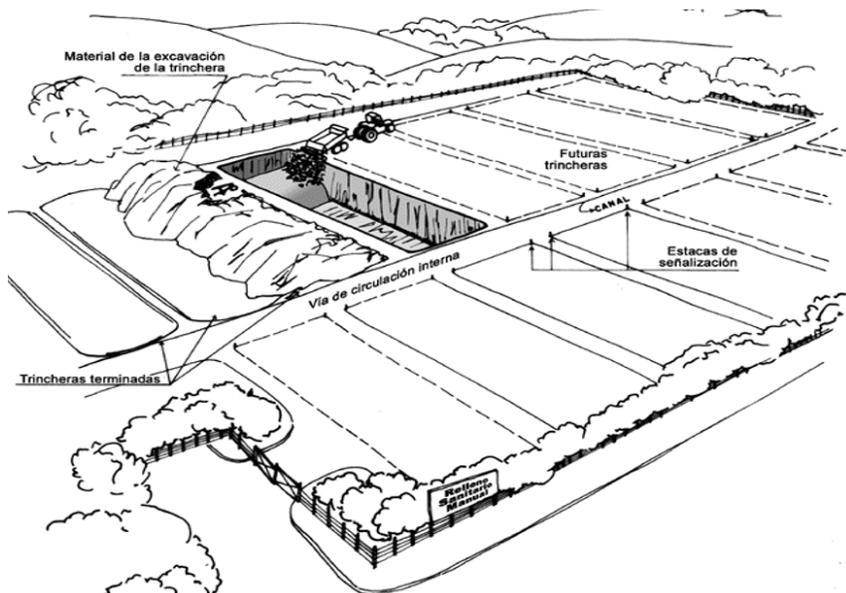
Figura 4: Explotación de un relleno sanitario y conformación típica de una celda

2.1.3 Métodos de vertido

Existen dos métodos básicos para el vertido de los residuos en los rellenos sanitarios: el de Trinchera y el de Área. Otras opciones son modificaciones de los dos métodos anteriormente señalados. El método de trinchera es más difícil de ejecutar, debido a que los diseños actuales demandan la implementación de un sistema de impermeabilización (natural o artificial) de la base del relleno y de sistemas de captación y desalojo de lixiviados. El método de área es actualmente el más utilizado, principalmente porque se adapta con mayor facilidad para la instalación de la infraestructura mencionada. En todo caso los diseños actuales, admiten excavaciones mayores para alcanzar la profundidad deseada y proceder a la construcción de sistemas de impermeabilización y captación de lixiviados, para posteriormente operar el sitio mediante el método de área. La descripción de cada método se presenta a continuación:

(1) Método de trinchera

Este método suele utilizarse cuando el nivel de las aguas subterráneas es profundo, las pendientes del terreno son suaves y las trincheras pueden excavarse con equipos normales de movimiento de tierras. Este método consiste en depositar los residuos en el talud inclinado de la trinchera (pendiente 3:1), donde se esparcen y se compactan con el equipo adecuado, por capas, hasta formar una celda diaria que posteriormente se cubrirá, al menos una vez al día², con el material excavado de la trinchera (o con material de préstamo de ser necesario), esparciéndolo y compactándolo sobre los residuos.

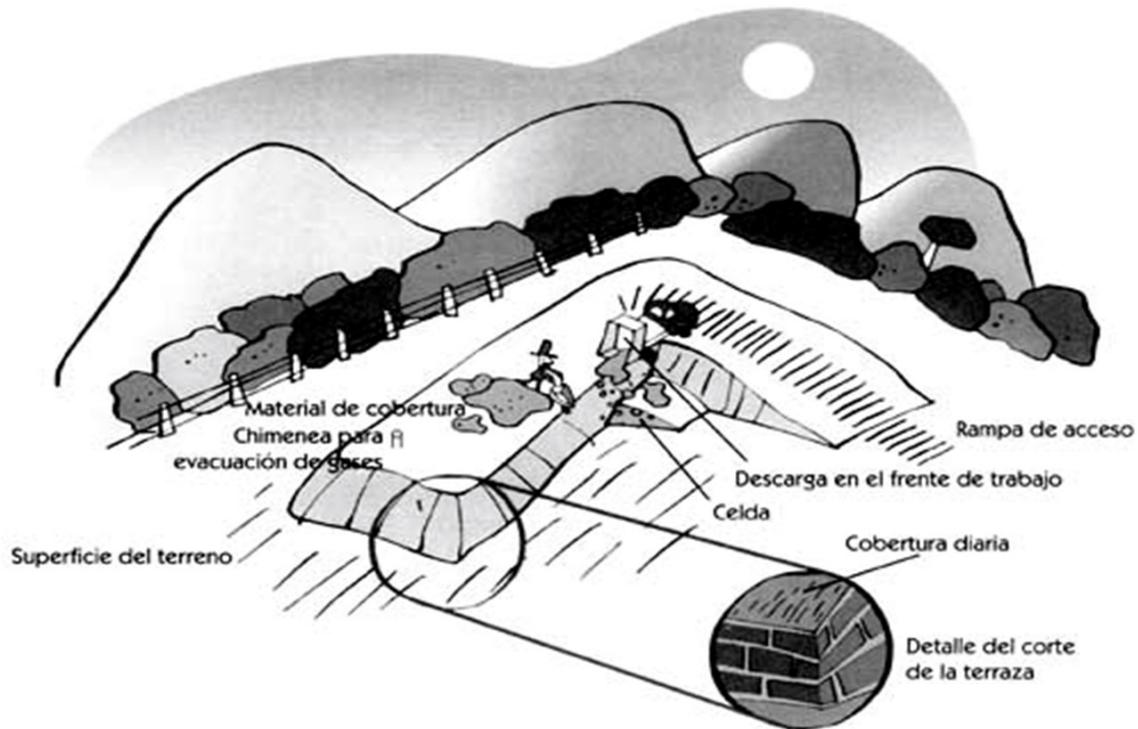


Fuente: (1) Jorge Jaramillo, Guía para el diseño, Construcción y operación de Rellenos sanitarios manuales. / 2) Tecnologías Apropriadas en Agua Potable y Saneamiento Básico (PAHO-OPS - World Bank, 2000, 152 p.)

Figura 5: Vertido por el Método de Trinchera

(2) Método de área

Este método puede utilizarse en cualquier tipo de terreno disponible, como minas o canteras abandonadas, cañones, terrenos planos, depresiones y zanjas contaminadas. Un aspecto muy importante es la proximidad del lugar donde se obtendría el material de cobertura, para no encarecer la operación. El método es similar al de la trinchera y consiste en depositar los residuos en el talud inclinado, se compactan en capas inclinadas para formar la celda que luego se cubre con tierra. Las celdas se construyen inicialmente en un extremo de la zona a rellenar y se avanza hasta terminar en el otro extremo.



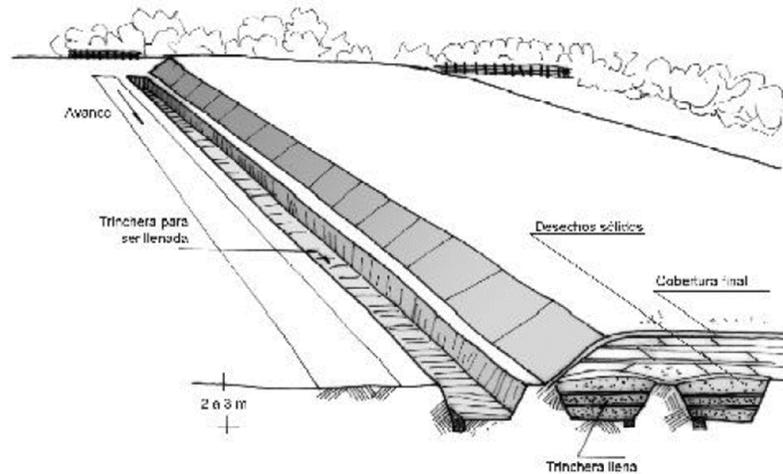
Fuente: (1) Jorge Jaramillo, Guía para el diseño, Construcción y operación de Rellenos sanitarios manuales. / (2) Tecnologías Apropriadas en Agua Potable y Saneamiento Básico (PAHO-OPS - World Bank, 2000, 152 p.)

Figura 6: Conformación de la celda por el Método de Área

(3) Método Combinado

En algunos casos, cuando las condiciones geohidrológicas, topográficas y físicas del lugar elegido para instalar el relleno son adecuadas, se pueden combinar los dos métodos anteriores, dando cabida a lo que se conoce como Método Combinado. Por ejemplo, comenzar con el método de trinchera y luego continuar con el método de área en la parte superior. Otra variante del método combinado es comenzar con un método de área, excavando el material de cobertura de la base de la rampa, formando una trinchera, que también servirá para ser rellena. El método combinado se considera el más eficiente porque puede significar un ahorro en el transporte del material de cobertura (siempre que esté disponible en la obra) y aumentar la vida útil del sitio.

2. Dadas las limitaciones financieras de la mayoría de los municipios del país, y considerando que el ciclo de la mosca es de 72 horas, el MMARN ha establecido al menos aceptable que la cobertura intermedia se realice al menos 3 veces por semana.



Fuente: (1) Jorge Jaramillo, Guía para el diseño, Construcción y operación de Rellenos sanitarios manuales.

Figura 7: Conformación de una celda por el método combinado.

Sin importar el método utilizado, es importante mencionar que la celda constituye el elemento primario y común de cualquier relleno sanitario. Es el componente elemental del relleno sanitario, por lo que su construcción de manera adecuada es el objetivo de la operación diaria de una instalación de este tipo.

2.1.4 ¿Qué ocurre con los residuos en un relleno sanitario?

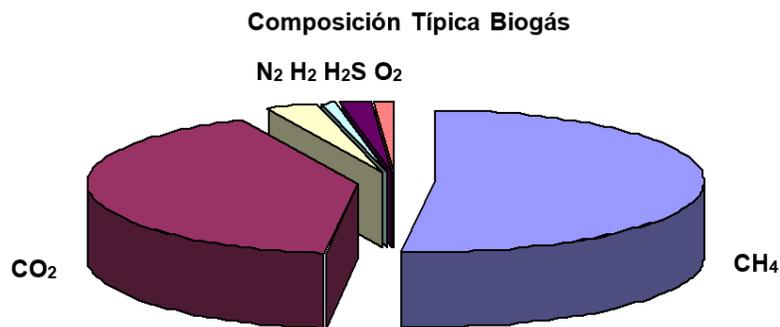
A modo de ilustración y aunque de forma muy general, se considera de interés presentar lo que ocurre en la masa de residuos una vez depositada en el suelo, para que los operadores sean conscientes de que un relleno sanitario es un ente vivo y dinámico, en el que se producen reacciones biológicas, químicas y físicas, que dan lugar a productos, en forma gaseosa y líquida, cuyos efectos sobre el medio ambiente y la salud no pueden ser olvidados y, por tanto, hay que prestarles la debida atención.

Las reacciones más significativas que ocurren en un relleno son biológicas, con la participación de microorganismos que descomponen la materia orgánica presente en los residuos sólidos urbanos, lo que da lugar a la formación de gases y eventualmente líquidos. El proceso de degradación comienza en presencia de oxígeno (condiciones aeróbicas), produciendo principalmente dióxido de carbono (CO₂), pero una vez consumido todo el oxígeno, el proceso continúa en condiciones anaeróbicas (ausencia de oxígeno) y en esta etapa la materia orgánica se transforma fundamentalmente en metano (CH₄), dióxido de carbono y muy pequeñas cantidades de amoníaco (NH₃) y sulfuro de hidrógeno (H₂S).

Simultáneamente a las reacciones biológicas, se producen reacciones químicas, entre las que destaca la disolución en los lixiviados de los productos de conversión biológica y de otros compuestos, especialmente los orgánicos, que pueden ser transportados fuera del área del relleno con los lixiviados. Estos compuestos orgánicos pueden incorporarse al ambiente a través del suelo (cuando hay derrames) o a través de las instalaciones de tratamiento de lixiviados. Otras reacciones químicas importantes son las que se producen entre determinados compuestos orgánicos y las capas de arcilla, que alteran las propiedades y la estructura de estas.

En cuanto a los cambios físicos en el relleno, los más importantes están asociados a la difusión de los gases dentro y fuera del SDF, al movimiento de los lixiviados en el relleno y hacia el subsuelo y a los asentamientos provocados por la consolidación y descomposición de los residuos depositados. La composición típica del biogás es.

• Metano (CH ₄):	50% a 60%
• Dióxido de carbono (CO ₂):	40% a 50%.
• Compuestos orgánicos volátiles (COVs):	Rastros
• Valor calorífico:	18,6 MJ / Nm ³ ó 4.450 kCal / Nm ³
• Contenido de humedad:	Saturado



Fuente: Presentación "Fundamentos del biogás", Ing. José Luis Dávila. SCS Ingenieros. Seminario "Reducción de las emisiones de metano en el sector de los residuos" Global Methane Initiative. CNCCMDL. Santiago, mayo 2014.

Figura 8: Composición típica del biogás

El hecho de que el biogás contenga un alto porcentaje de metano, aumenta los riesgos de explosión o combustión.

El metano es un gas incoloro, inodoro e insípido, más ligero que el aire, relativamente insoluble en agua y altamente explosivo. Su límite inferior de explosión es 5% en el aire y su límite superior de explosión = 15% en el aire. Es un gas de efecto invernadero porque absorbe la radiación infrarroja terrestre (calor) que de otro modo escaparía al espacio (característica de un GEI). El metano es un GEI que contribuye 25 veces más que el CO₂ al calentamiento global³.

El movimiento de los gases y las emisiones merecen especial atención; por ejemplo, cuando el biogás queda atrapado, la presión interna puede provocar grietas en la cubierta y fisuras, permitiendo que el agua penetre a través de estas grietas. La humedad genera una mayor producción de gas y, en consecuencia, provoca un mayor agrietamiento. A mayores grietas, más probable es la fuga de biogás, que lleva rastros de compuestos cancerígenos y teratogénicos que se incorporan al medio ambiente.

En relación con los compuestos cancerígenos y teratogénicos, cabe mencionar que se han realizado varios estudios en diferentes lugares (Canadá, EEUU, Alemania, entre otros) que demuestran la vinculación de estos gases con diversos trastornos de la salud, como malformaciones congénitas, y, sobre todo, cáncer. Uno de estos estudios, realizado en Montreal, mostró un aumento estadísticamente significativo del bajo peso al nacer en los recién nacidos en comparación con una población de referencia no expuesta⁴.

3. IPCC, 2007.

4. Décharges et santé des populations riveraines, CEFE, automne 1995. Pag. 2 – 5. Los casos restantes corresponden a esta referencia.

Otro realizado en Nueva York mostró un aumento moderado, pero estadísticamente significativo del riesgo de malformaciones en los neonatos cuando las madres residían cerca del vertedero. En Alemania se detectó un aumento estadísticamente significativo del número de leucemias en la comunidad de Petershagen, situada a 5 km al suroeste del SDF. Otro estudio similar muestra un aumento estadísticamente significativo del número de leucemias en la comunidad de Stadthagen, situada a 8 km al sureste.

2.2 Ventajas y desventajas de un relleno sanitario

2.2.1 Ventajas

El relleno sanitario, como uno de los métodos de disposición final de los residuos sólidos urbanos, es la alternativa más económica; sin embargo, es necesario asignar suficientes recursos financieros y técnicos para la planificación, el diseño, la construcción y la operación. Las ventajas más importantes son:

- La inversión de capital inicial es menor que la necesaria para la implementación de un sistema de incineración.
- Cuando se dispone de material para cubrir los residuos sólidos en el mismo sitio, esta condición es generalmente la más económica de las diferentes opciones para la disposición final.
- El relleno sanitario es un método para la disposición final de residuos sólidos, que no requiere operaciones adicionales, como la incineración, para la disposición de los productos finales.
- Luego del cierre, los sitios de disposición final pueden ser transformados en áreas útiles para la creación de parques, zonas recreativas y de esparcimiento, o simplemente zonas verdes.
- Es un método flexible, ya que en caso de aumentar la cantidad de residuos a disponer se necesita muy poco equipo y personal.
- El gas metano generado por la descomposición de la fracción orgánica contenida en los residuos sólidos puede ser atractivo para su uso como fuente de energía no convencional, dependiendo de las características del lugar.



2.2.2 Desventajas

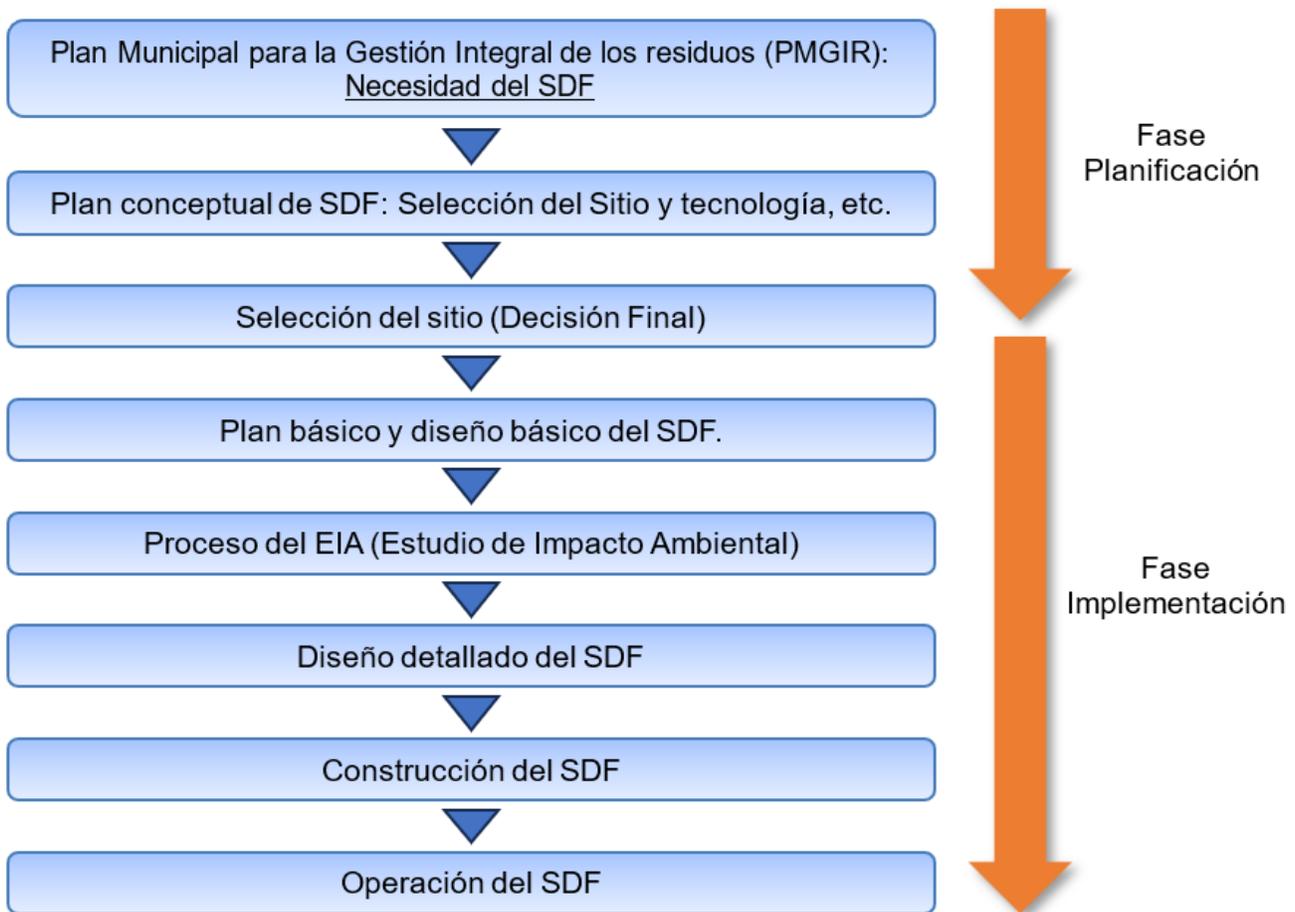
La oposición de la población a la construcción de un relleno sanitario se debe a dos aspectos fundamentales: el desconocimiento del método de vertido y la desconfianza en los funcionarios públicos de la localidad. Además, su establecimiento y operación engloban una serie de factores que no son deseables, como son:

- Requiere una gran cantidad de terreno, según la capacidad. Esto es especialmente importante en lugares con poca disponibilidad de terreno.
- La supervisión continua es necesaria para mantener un alto nivel operativo y garantizar que no haya fallos en el futuro.
- Cuando no hay terrenos cerca de las fuentes de generación de residuos sólidos, debido al crecimiento urbano, el costo del transporte se verá fuertemente afectado.
- La relativa proximidad de los SDF a las zonas urbanas puede causar graves problemas de quejas públicas.
- Existe un alto riesgo de que, especialmente en los países del tercer mundo, debido a la falta de recursos económicos para la operación y el mantenimiento, el relleno sanitario se convierta en un vertedero a cielo abierto.
- Puede producirse la contaminación de las aguas subterráneas y superficiales cercanas, así como la generación de olores y gases desagradables, si no se toman las medidas de control y seguridad adecuadas.
- Los asentamientos diferenciales que sufren los rellenos sanitarios con respecto al tiempo, impiden su uso inmediato una vez finalizadas las operaciones, teniendo que esperar un tiempo considerable antes de darle el uso previsto.

3. PLANIFICACIÓN DE UN SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL

La gestión adecuada de un sitio de disposición final involucra el desarrollo exitoso de las etapas de planificación, diseño, construcción, operación, cierre y uso post-cierre.

En este manual solo se abordarán la planificación, diseño y construcción de un SDFN, en tanto que los demás temas se abordan en sus respectivos Manuales. En la siguiente figura se presenta un ejemplo del flujo típico del desarrollo de un SDF nuevo:



Fuente: Equipo de Expertos de JICA (Extracto Manual CAS)
 Figura 9: Flujo del desarrollo de un proyecto de SDF (ejemplo).

3.1 Proceso de aprobación y plan de desarrollo de un SDF Nuevo

El flujo del procedimiento de desarrollo del nuevo SDF es el siguiente:

- El municipio o la mancomunidad prepara los documentos relacionados con el plan de desarrollo del nuevo SDF y los presenta al MMARN.
- El MMARN evalúa estos documentos y aprueba la aplicación para una solicitud de fondos al Fideicomiso.
- El Fideicomiso evalúa y aprueba las solicitudes presentadas y paga las subvenciones.

Los roles detallados de cada institución en el proceso de desarrollo de un nuevo SDF se presentan a continuación:

Municipio • Mancomunidad

- Preparación del PMGIR
- Preparación y diseño básico
- Preparación de las consideraciones ambientales y sociales
- Elaboración del plan de desarrollo de instalaciones.
- Preparación del formulario de solicitud al Fideicomiso
- Elaboración del diseño de detalle
- Elaboración de obras de licitación
- Construcción
- Operación

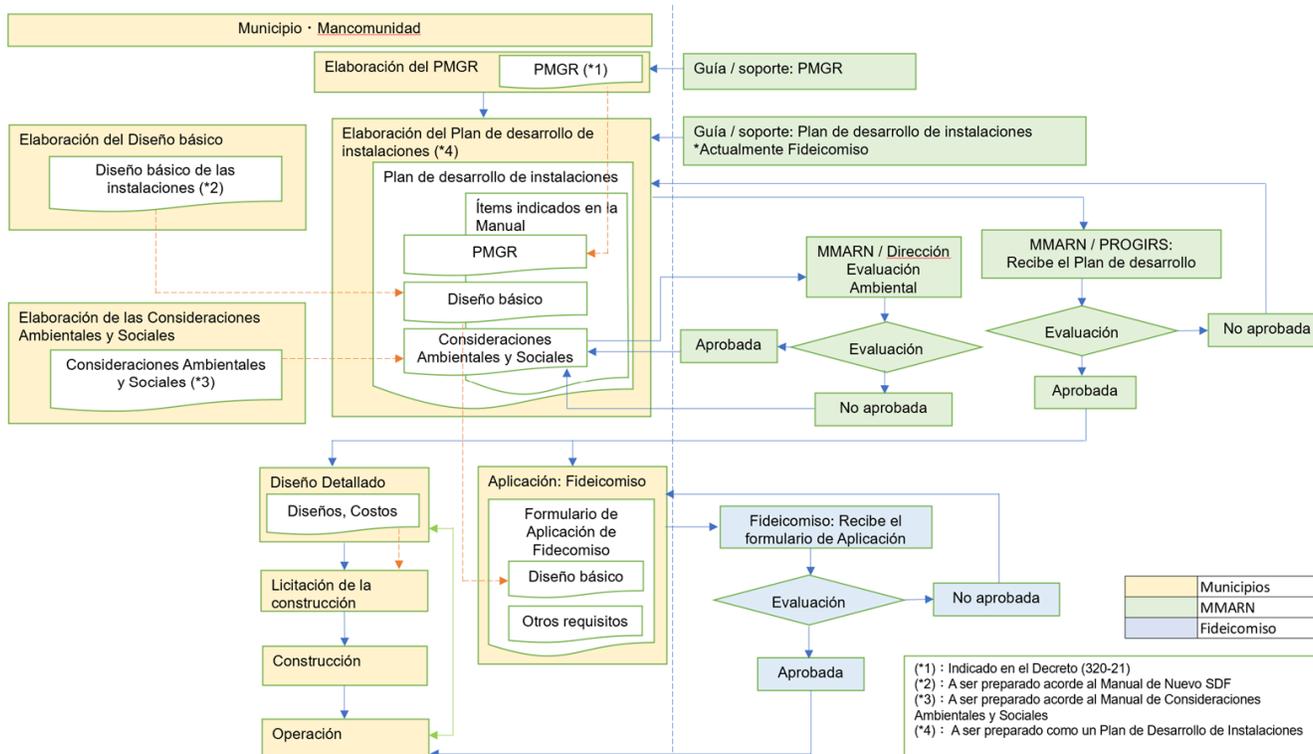
Ministerio de Medio Ambiente (MMARN)

- Orientación y apoyo para la preparación del PMGR
- Orientación y apoyo para la elaboración de planes de desarrollo de instalaciones
- Evaluación y aprobación de las consideraciones ambientales y sociales por parte de la Dirección de Evaluación Ambiental.
- Evaluación y aprobación de planes de desarrollo de instalaciones por parte del Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos

Fideicomiso

- Evaluación y aprobación de las solicitudes de fondos al Fideicomiso.
- Pago de subvenciones (para la operación)

La Figura 10 muestra el flujo del procedimiento para el desarrollo de un nuevo SDF según el procedimiento que indica la normativa vigente:



Fuente: Equipo de expertos de la JICA

Figura 10: Flujo del procedimiento de aprobación para desarrollo del nuevo SDF

El plan de desarrollo debe describir como mínimo el período de uso del SDF, la capacidad, la protección ambiental, el máster plan de la instalación y el plan de trabajo para la fase de construcción, y ser presentado al MMARN. El MMARN juzgará la viabilidad del SDF Nuevo en función del plan de desarrollo y decidirá si el proyecto procede o no. Los elementos que deben incluirse en el plan de desarrollo figuran en la Tabla 1:

Tabla 1: Elementos a incluir en el plan de desarrollo de un SDF Nuevo

Cap. 1 Generalidades
1. Ubicación del proyecto en relación con el entorno circundante
2. Área requerida para la disposición final y tipos de residuos entrantes
Cap. 2 Plan para SDF
1. Período de operación y capacidad del relleno
2. Cobertura del suelo requerida
3. Plan de distribución general
Cap. 3 Plan de conservación del medio ambiente
Cap. 4 Máster plan del proyecto y sus instalaciones
1. Diseño básico de cada componente
2. Costos y financiamiento del proyecto
Cap. 5 Plan de trabajo para la fase de construcción
1. Fases y Cronograma de ejecución de la obra
Cap. 6 Plan de operación y mantenimiento
1. Contenido del Plan de operación y mantenimiento
2. Costos y financiamiento de la operación y mantenimiento

Fuente: Equipo de expertos de la JICA

3.2 Selección del sitio

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.

Aunque este tema está ampliamente desarrollado en el capítulo 2 del Manual de CAS para los SDF, por considerarse un aspecto fundamental para el desarrollo de un nuevo SDF, se presenta un resumen de los aspectos más importantes.

3.2.1 Consideraciones para la selección del sitio

Dado que son múltiples las variables que juegan un rol preponderante en la selección de un sitio para la disposición de los residuos sólidos, y que van mucho más allá de los aspectos de la ingeniería y de los costos asociados, el primer paso para dicha selección conllevará el análisis de alternativas. El análisis de alternativas para la selección del sitio involucra, además de la determinación de las alternativas de ubicación y posible número de estaciones de transferencia que se requerirán, si es el caso, las consideraciones sobre las variables técnicas, económicas y legales.

En el aspecto técnico se deberán considerar temas ambientales, sociales y económicos; en el caso del criterio económico se tomarán en cuenta la distancia del transporte de los residuos y la infraestructura de transferencia, si se requiere, entre otros; en el aspecto legal, se evaluará el estatus legal del terreno y la posibilidad del cumplimiento con la normativa vigente.

3.2.1.1 Metodología de evaluación

Para llegar a la selección de las alternativas principales a presentar, es necesario realizar un primer escaneo, en el que se pueda verificar si el terreno, a primera vista aceptable, cuenta con el área disponible que garantice una vida útil mínima al futuro relleno sanitario. Existen distintas herramientas pertinentes para la preselección de terrenos que podrían resultar favorables para la instalación de un SDF:

- Métodos de Exploración Geológica (búsqueda de terrenos adecuados, exploración por softwares y mapas geológicos, geomorfológicos y estratigráficos disponibles).
- Mapas satelitales, temáticos, mapas topográficos provinciales
- Visita a instituciones estatales y particulares a fin de obtener Información técnica bibliográfica sobre el terreno propuesto proporcionada por diversas instituciones visitadas en la localidad.
- Datos técnicos previos de informes profesionales particulares.
- Visitas técnicas al campo con el objetivo de verificar los datos obtenidos.
- Dispositivo de comunicación en el campo.
- Reuniones técnicas con consultores pertinentes y dirigentes comunitarios.

3.2.1.2 Criterios de Evaluación

A manera general, se realizará una primera verificación en cuanto a los siguientes criterios:

- Uso actual del suelo y planes urbanos.
- Distancias entre alternativas y zonas beneficiadas.
- Tamaño del terreno o superficie disponible para rellenar (ha).
- Pasivos Ambientales
- Calidad del suelo (permeabilidad, compactación)
- Accesibilidad al sitio (distancia a vía de acceso km)
- Propiedad del terreno (disposición para su adquisición)
- Barrera Sanitaria y Geológica
- Vulnerabilidad a desastres naturales
- Distancia a la población (Km)
- Opinión Pública
- Distancia a fuentes de aguas superficial
- Distancia a aeropuertos (aeródromos, aeropuertos de turbina)

Otras distancias consideradas en la normativa vigente.

Algunos de los elementos del listado anterior no están directamente relacionados con la gestión de los residuos, pero son un punto decisivo para la selección del sitio. La normativa local establece diferentes categorías e instrumentos de gestión ambiental y ordenamiento territorial que no pueden dejarse de lado. Por ello, es importante destacar que se deberán tomar en cuenta:

(1) Infraestructura de transporte y acceso

Los SDF deben estar ubicados lo más lejos posible de las zonas pobladas, pero debido al propósito de recibir los residuos de dichas zonas, es necesario contar con una infraestructura que facilite el transporte de los residuos y la obtención de materiales y equipos. También es importante tener en cuenta el acceso de los vehículos de respuesta de emergencia a los accidentes e incendios en el sitio.

(2) Planificación del uso de suelo post-cierre

Cuando un SDF alcance su año objetivo, se cerrará y el sitio se utilizará para otros fines. En la mayoría de los casos, el terreno se destinará a instalaciones no residenciales de bajo costo de construcción, como parques e instalaciones recreativas, pero es importante prever el uso del terreno tras el cierre en la fase de selección del sitio.

(3) Zonas de fácil acceso a los suministros

Es necesario seleccionar una zona en la que los materiales y el equipo para la construcción de las instalaciones del SDF y sus operaciones diarias puedan llevarse a cabo fácilmente. En concreto, se trata de materiales para las instalaciones, equipos pesados para la operación, tierra y arena para la cobertura diaria y piezas de repuesto para los equipos. Si estos materiales pueden adquirirse fácilmente, los costos de construcción y operación pueden reducirse.

(4) Impacto en la dirección del crecimiento de la red urbana y de los aviones

A la hora de seleccionar un sitio candidato, es necesario considerar la dirección del crecimiento de la red urbana de la población circundante. Esto se debe a que hay que tener en cuenta que cuando la urbanización llegue al SDF, éste se cerrará, se gestionará y se cambiará el uso del suelo. Además, un SDF no puede estar situado en dirección con la trayectoria de despegue y aterrizaje de los aviones en la pista del aeropuerto. Esto para evitar que las operaciones de los aviones se vean afectadas en caso de incendio en el sitio, entre otros posibles inconvenientes.

(5) Evaluación de los terrenos preseleccionados o alternativas

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:

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

Podemos citar como ejemplo la experiencia local de la selección de un sitio para la ubicación del nuevo relleno sanitario para la Mancomunidad del Gran Santo Domingo. El equipo consultor encargado realizó la evaluación de las alternativas aceptadas para la ubicación del relleno sanitario en base a un análisis multicriterio en concordancia a las buenas prácticas aceptadas internacionalmente y la normatividad de República Dominicana. Se definieron 23 criterios de selección cuyos puntajes variaban según el sitio analizado. El análisis del criterio técnico se clasificó en tres categorías de análisis: ambiental, social y económico con un factor de ponderación de 50%, 30% y 20% respectivamente. Cada criterio de selección tuvo un rango de valoración del 1 al 5. La valoración final se estableció en base a un proceso presencial de discusión, opinión y consenso de expertos de diferentes disciplinas. Los parámetros considerados se presentan a continuación:

Tabla 2: Criterios para el análisis de alternativas de ubicación para un relleno sanitario de la Mancomunidad de Ayuntamientos del Gran Santo Domingo

CATEGORIA	CRITERIO DE SELECCIÓN	PUNTAJE (1 al 5)
AMBIENTE Factor de Ponderación 50%	1. Pasivos ambientales	_____
	2. Distancia a fuentes de aguas superficiales (m) medidas en línea recta	_____
	3. Distancia a fuentes de abastecimiento de aguas sub- superficiales	_____
	4. Calidad y uso del agua	_____
	5. Barrera geológica y potencial de expansión del área	_____
	6. Posibilidad del material de cobertura	_____
	7. Profundidad del nivel freático (m)	_____
	8. Condiciones meteorológicas del sitio (principalmente prec. anual)	_____
	9. Permeabilidad de suelo	_____
	10. Dirección predominante del viento	_____
	11. Área natural protegida por el estado	_____
	12. Vulnerabilidad a desastres (inundaciones, sismos, maremotos)	_____
	13. Topografía del terreno (% pendiente)	_____
SOCIAL Factor de Ponderación 30%	14. Distancia a la población	_____
	15. Vulnerabilidad social (aumento de conflictividad social, cambio en el perfil epidemiológico, reasentamientos, etc.)	_____
	16. Incremento del tránsito vehicular	_____
	17. Disposición de la comunidad del área de influencia directa del proyecto a la aceptación del mismo.	_____
ECONÓMICO Factor de Ponderación 20%	18. Uso actual del suelo y uso planificado para el futuro	_____
	19. Accesibilidad	_____
	20. Propiedad del terreno y Factibilidad de Compra	_____
	21. Tamaño del terreno o superficie disponible para rellenar (ha)	_____
	22. Distancia a unidades de producción agropecuaria (granjas)	_____
23. Distancia a infraestructura económica estratégica (aeropuerto)	_____	

Fuente: Diseño de un plan de Manejo Integral para los residuos sólidos en la MAGSD, Nippon Koei-Kokusai Kogyo, BID, 2013

La ponderación de todos los parámetros anteriores para cada uno de los lugares identificados, dará como resultado la selección de la mejor alternativa para la ubicación del SDF.

3.2.2 Levantamiento de la situación actual del sitio: Estudios Previos

Para conocer las características de un posible SDF, es necesario realizar un levantamiento de la situación actual del sitio, en el cual se realizan una serie de estudios previos, de manera tal que se cuente con la información y parámetros básicos para la selección. A continuación, se indican los estudios que se refieren al terreno, sin olvidarse de la verificación necesaria de la normativa aplicable sobre el uso de suelo, áreas protegidas, áreas de desarrollo urbano, entre otros elementos (ver capítulo 1.1, Marco Legal).

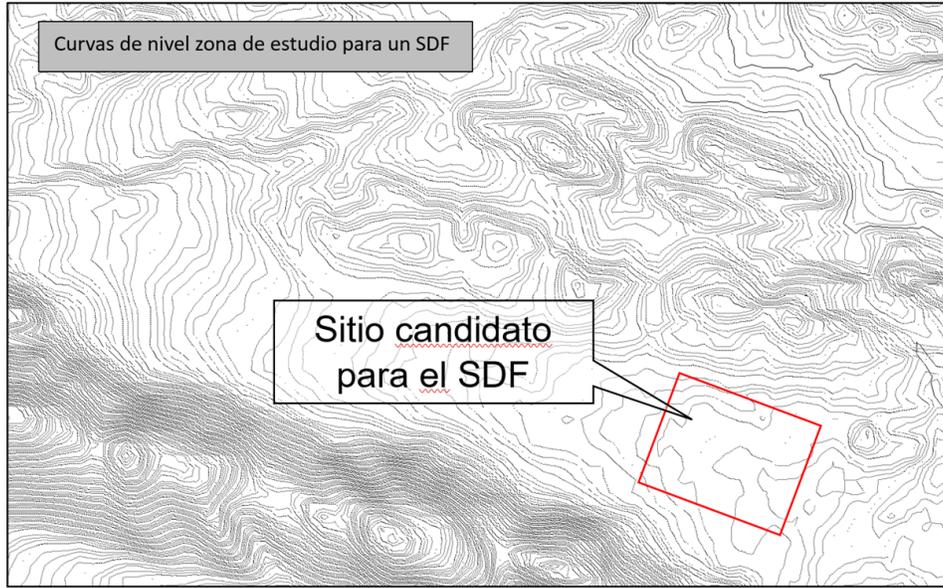
En cuanto a las características y condiciones particulares del terreno, se considerarán como mínimo:

(1) Determinación del Derecho de propiedad

Sin importar si el proyecto del SDF nuevo es público o privado, es necesario tener definido el derecho de propiedad del predio, ya que, en caso de ser propiedad privada, será necesaria la compra o expropiación, puesto que de otra forma no se podrán realizar inversiones que garanticen las operaciones del sitio a largo plazo.

(2) Topografía

Primeramente, se tendrán los trabajos de localización y orientación del terreno. En segundo lugar, se contemplan los trabajos correspondientes a la altimetría, secciones y curvas de nivel del terreno, que actualmente y en el futuro está previsto para la disposición final. Como parte importante se tiene la determinación del relieve original del sitio a nivel de terreno natural, lo cual será factible de obtener a partir de estudios anteriores o mediante restituciones fotogramétricas para tal fin. En el nivel de diseño básico, como se muestra en la figura a continuación, otro método es crear un mapa topográfico de área amplia a partir de la información de la cuadrícula nacional. Sin embargo, en este caso, aunque es posible representar la condición ondulada de la superficie del suelo, se requiere un levantamiento por separado para estructuras importantes como edificios y caminos.



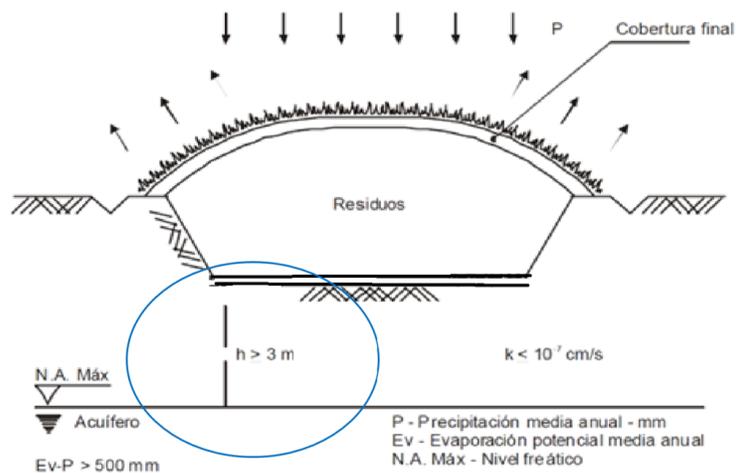
Fuente: LMD

Figura 11: Ejemplo de mapa topográfico de área amplia

(3) Hidrología e hidrogeología

Es necesario un informe relativo a las características geológicas y geohidrológicas del sitio. Estudios regionales y/o zonales se pueden encontrar en las oficinas locales relacionadas al suministro de agua del país, ya sea que se tengan estudios preliminares o datos de pozos cercanos, para establecer la existencia de acuíferos en la zona, profundidad, dirección de flujo, entre otras características.

Al seleccionar un sitio, se deberá asegurar que al instalar las celdas se podrá mantener una distancia mínima de 3m desde la base de la celda al acuífero, como se muestra en la siguiente figura:



Fuente: (1) Jorge Jaramillo, Guía para el diseño, Construcción y operación de Rellenos sanitarios manuales.

Figura 12: Esquema condiciones climatológicas e hidrológicas favorables.

En caso de que no se disponga de información, es necesario generarla. El estudio geofísico, consta de sondeos eléctricos verticales (SEV's), determinando la resistividad en campo y posterior interpretación de resultados que permiten conocer el subsuelo con buena aproximación.

(4) Mecánica de suelos

Las propiedades mecánicas de los suelos tienen gran influencia en el comportamiento de diversos fenómenos esperados en un SDF. Se recomienda determinar los siguientes parámetros de campo y laboratorio: capacidad de carga; permeabilidad; clasificación de suelos; capacidad de intercambio catiónico; peso volumétrico; granulometría; contenido orgánico total; límites de consistencia; compresión triaxial; compactación Proctor estándar; pH; humedad y porosidad. Con estos parámetros es posible establecer el diseño del relleno, calculando altura máxima, potencial de infiltración de lixiviados, espesor de suelo de intercambio, entre otros.

(5) Climatología y meteorología

La precipitación pluvial es un factor importante en la formación de lixiviados y para el diseño de la operación del futuro sitio y obras complementarias. Los datos de fuentes bibliográficas o documentales (de estaciones meteorológicas de la región) son: precipitación pluvial, temperaturas y dirección de los vientos.

(6) Estudio de la Flora y la Fauna

Examinar el tipo, la ubicación y la densidad de los árboles, la vegetación y los cultivos. Para más detalles, ver Manual de las CAS para la construcción de SDF.

(7) Estudio Socioeconómico de la población

Determinar la población y la distribución de la zona circundante mediante censos y encuestas estadísticas. Ver Manual de las CAS para la construcción de SDF.

(8) Estudio del tráfico

Realizar un estudio de las condiciones de tráfico en la zona circundante no es imprescindible pero sí de gran importancia, especialmente cuando se trata de SDF grandes que ameritan un flujo diario de camiones considerable.

3.2.3 Necesidad de crear consenso público

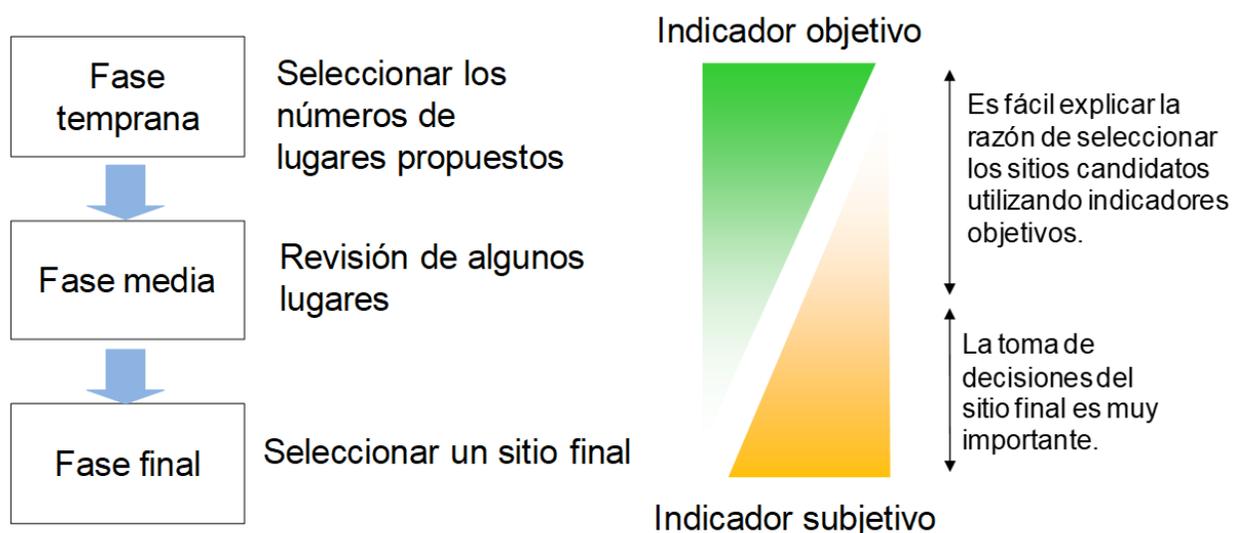
La participación y la cooperación de los residentes son esenciales para que las autoridades responsables puedan lograr una adecuada gestión integral de los residuos sólidos. En particular, la construcción de un SDF requiere promover la comprensión y aceptación de la comunidad.

Los vecinos reconocen que el manejo de residuos sólidos es un servicio público necesario para asegurar una vida higiénica. No obstante, por lo general se oponen a que se implemente un SDF en sus zonas aledañas a sus residencias porque creen que generará olores indeseables, ruidos, y demás tipos de contaminación. Este problema se conoce como el problema “SPAN” (Sí, Pero Aquí No) o NIMBY” (“Not in my Back yard”) en inglés (“No en mi patio trasero”) y es común en todo el mundo.

Es imprescindible llegar al consenso a través de esfuerzos para resolver los problemas de manera racional, a fin de que se pueda lograr un entendimiento mutuo entre los residentes y el gobierno municipal. La toma de decisiones democrática, el respeto a los derechos humanos, la participación de las partes interesadas y la transparencia de la información son esenciales para concitar el genuino involucramiento ciudadano. Las consideraciones ambientales y sociales permiten tener en cuenta las potenciales afectaciones a los comunitarios y su entorno, por lo que constituyen elementos esenciales para la creación del obligado consenso.

Es necesario que los municipios y los promotores entiendan que se debe obtener el consentimiento de los residentes y/o comunidades aledañas para la construcción y operación de un SDF.

La decisión final debe depender del balance entre, por un lado, el indicador subjetivo que se refiere a la aprobación del lugar seleccionado contando con el apoyo de la comunidad: y, por el otro lado, el indicador objetivo que tiene que ver con los requisitos legales, técnicos y económicos con los cuales a cumplir el lugar propuesto.



Fuente: Equipo de expertos de la JICA

Figura 13: Indicadores objetivos frente a los subjetivos

Para obtener el consenso público, se recomienda tomar en cuenta los siguientes puntos importantes:

- Llevar a cabo acciones clave para obtener el consentimiento de los residentes: Divulgación de información y explicación a los residentes sobre el SDF.
- Considerar el mejoramiento de las infraestructuras sociales a las comunidades del entorno como compensación por los cambios que generará la nueva infraestructura en su entorno.
- Realizar las actividades recomendadas para obtener el consentimiento de los residentes: charlas, capacitaciones.

Desde la fase de planificación, se recomienda iniciar el proceso de creación de consenso público, involucrando a las diferentes partes interesadas y manteniendo un flujo de información de forma transparente y sincera, con el fin de considerar las diferentes opiniones y garantizar la aceptación del proyecto.

En el Manual de Consideraciones Ambientales y Sociales (CAS) para el desarrollo de SDF, se desarrolla este tema con amplia explicación y detalles.

4. DISEÑO BÁSICO DE UN RELLENO SANITARIO

4.1 Cálculos preliminares para el diseño de un relleno sanitario

Previo al diseño de un relleno sanitario, se deberá determinar el área requerida para la disposición final de residuos, las obras complementarias y área de amortiguamiento, según el horizonte de vida útil definido entre 15 a 20 años. La vida útil del SDF debe ser de al menos 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)

4.2 Proyección de la generación per cápita y total

El parámetro básico para el diseño de un sitio de disposición final es la cantidad de residuos que se van a disponer en él, la cual se determina mediante la realización de un estudio de caracterización de residuos sólidos, que no es más que conocer cuánto y qué se produce.

La formulación del diseño básico para un sitio de disposición final incluye la definición de los siguientes elementos:

- Año: El año objetivo debe establecerse para un mínimo de 20 años.
- Capacidad de disposición de residuos prevista (Ton ó m³)
- Cantidad prevista de disposición de residuos (t)
- Disponibilidad del material de cobertura
- Método de disposición final (área, trinchera o mixto)
- Tipo de relleno (manual o mecanizado/ anaeróbico o semiaróbico)

De acuerdo con las condiciones locales, es de suma importancia considerar lo establecido en el Art. 133 sobre la obligación de la disposición final conjunta de 3 municipios/DMs, cuando se construya un nuevo SDF. Estos deben considerar la gestión conjunta a través de la creación de mancomunidades o cualquier otro instrumento jurídico. Cabe destacar la conveniencia de una asociación público-privada.

Para poder realizar los cálculos, debe señalarse la población actual y el 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. Dicha información debe estar respaldada por la fuente correspondiente.

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 del presente Manual, 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:

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

Donde:

Pf: Población proyectada (hab)

r = Tasa de crecimiento %

Po: Población año base (hab)

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:

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

Como se mencionó al inicio, la forma idónea de obtener la Generación per Cápita (GPC) de residuos es a partir de un Estudio de Caracterización y debe organizarse para cada fuente de generación (domicilios, comercios, instituciones). Cuando los municipios no puedan identificar el área comercial donde existan edificios residenciales, comercios (GPCo) e instituciones, los datos per cápita son asumidos como zonas residenciales. La GPC 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:

Para las viviendas:

$$GPC = \text{kg peso recolectado} / \text{Numero de Habitantes muestreados}$$

Para los comercios e instituciones:

$$GPCo = \text{kg peso recolectado} / (\text{Numero de Comercios muestreados})$$

Para otro tipo de producción per cápita de residuos se utiliza la misma metodología. En caso de no poder realizarse un estudio de campo, existen varios métodos también útiles, aunque no necesariamente tan fiables, como el anterior, por ejemplo: **pesaje total de los camiones recolectados por día vs. la población servida.**

En el Manual de Caracterización de RSM elaborado en la Fase I de FOCIMIRS, se presenta de manera detallada el paso a paso para realizar este estudio.

En el Manual de Caracterización de RSM elaborado en la Fase I de FOCIMIRS, se presenta de manera detallada el paso a paso para realizar este estudio.

4.3 Tipo de residuos, composición y características

El tipo de residuos, su composición y sus características son aspectos importantes a tomar en cuenta para el diseño de un SDF. En un relleno sanitario, por definición, solo se permite la disposición de residuos sólidos urbanos y aquellos asimilables, aunque provengan de otras fuentes no domiciliarias de generación. La Ley 225-20 dispone en el párrafo I que los residuos peligrosos no se dispondrán en rellenos sanitarios y en el Art. 134 se indica su disposición en celdas de seguridad. Por su parte, el Art. 128 establece las excepciones para la disposición final de residuos de manejo especial que se pueden disponer en rellenos sanitarios, en celdas separadas preparadas de manera específica para este fin, dentro del predio, a saber:

- Los residuos de lodos provenientes de procesos industriales que, por su composición se consideren no peligrosos, debiendo ser debidamente acondicionados previamente.
- Los lodos procedentes de planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, siempre que presenten una humedad máxima del ochenta por ciento.
- Otros residuos de manejo especial que, por la inexistencia en el país de tecnología e infraestructura, no puedan ser valorizables podrán disponerse en rellenos sanitarios en celdas especiales separadas.

4.4 Capacidad requerida

El diseño básico de un relleno sanitario se refiere al cálculo del área total requerida para la instalación de las celdas donde se depositarían los residuos (incluyendo su cobertura), así como el espacio requerido para las instalaciones complementarias. El material de cobertura, se calcula aplicando un factor, al igual que el área requerida para las instalaciones complementarias.

El área total requerida para el SDF viene dada por la cantidad de superficie (m^2 o ha) necesaria para desarrollar el SDF en su conjunto. La determinación se realiza en cuatro pasos:

4.4.1 Paso 1: Cálculo de la cantidad (peso) de residuos generados/año

Se calcula a partir de la generación per cápita (kg/hab/día), multiplicada por el número de habitantes y luego por los 365 días del año.

Cabe indicar que la separación de los residuos en la fuente o en una planta de recuperación de materiales, puede reducir la cantidad de residuos que se depositaría en un relleno sanitario. De este modo, se aumenta la vida útil de la obra y se reducen los costos de operación.

La vida útil mínima recomendada debe ser 15 años o más; de lo contrario, los costos de adquisición y preparación del terreno probablemente no estarían justificados. Lo recomendable sería una vida útil de más de 20 años⁵. Por otro lado, se recomienda tener en cuenta el crecimiento o disminución poblacional a la hora de calcular la generación de residuos en los años siguientes, así como el aumento de la generación de residuos, debido al desarrollo económico de la zona, región o comunidad en cuestión.

5. Fuente: Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios. Ecuador 2002. Página 6

4.4.2 Paso 2: Cálculo del volumen (m³) de residuos a depositar

Se refiere al volumen que ocuparían en el relleno, los residuos generados por toda la población a servir. En el paso 1, determinamos el peso. Para convertir peso a volumen, se divide por la densidad o peso específico que tendrán los residuos depositados en la celda, que viene dada en kg o ton/m³.

La densidad de los residuos varía en función de su estado de compactación, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Densidad de los residuos sólidos

Residuos sólidos	Densidad
En el contenedor doméstico	105 - 210 kg/m ³
En el recolector	350 - 630 kg/m ³
Compactación en el vertido manual	400 - 600 kg/m ³
Con maquinaria de compactación	600 - 810 kg/m ³

Fuente: Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios. Ecuador 2002. Página 6

Normalmente, en la literatura se presentan fórmulas directas para el cálculo del volumen de residuos a depositar, no en los pasos indicados. Sin embargo, indicar los pasos ayuda a una mejor comprensión por parte del lector. Los pasos 1 y 2, se resumen aplicando una de las siguientes fórmulas⁶, según la disponibilidad de los datos:

$$V_{\text{residuos}} = \text{GPC} \cdot \text{H} \cdot 365 \cdot \text{N} / \text{D} \quad (1)$$

Donde:

V: Volumen de residuos

N: Vida útil del vertedero (años)

GPC: Generación per cápita

D: Densidad de los residuos

H: Número de habitantes a servir

365 = Número de días al año (días)

$$V_{\text{residuos}} = (365 \cdot \text{Td}) / \text{Pv} \quad (2)$$

Donde:

Vresiduos = Volumen anual (m³/ año)

365 = Número de días al año (días)

TD = Toneladas recogidas diariamente (t / día) * del flujo de residuos

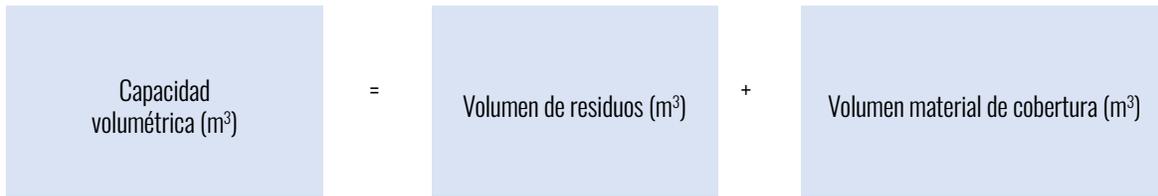
PV = Peso volumétrico o densidad de los residuos compactados en el vertedero (t/m³)

4.4.3 Paso 3: Cálculo de la capacidad volumétrica

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.

6. Fuente: Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios. Ecuador 2002. Página 6

Capacidad Volumétrica = Volumen de residuos (m³) + volumen de la cobertura (m³)



El volumen de la cobertura se estima como un porcentaje del volumen ocupado por los residuos depositados, un 30%. Siendo así:

Capacidad volumétrica = Volumen de residuos (m³) + 30% volumen residuos (m³).
Esto equivale a multiplicar el volumen de residuos por 1.3, como se indica en la fórmula siguiente:

$$V_{celdas} = 1.3 \times V_{residuos} \quad (3)$$

4.4.4 Paso 4: Cálculo del área total requerida para el SDF

Área total del SDF = Área de las celdas o relleno + Área de instalaciones complementarias.

(1) Área de las celdas o del relleno

A partir del volumen requerido, se puede calcular la superficie necesaria para el vertido, la cual depende principalmente de tres factores importantes:

- Volumen ocupado por la celda
- Tipo de relleno (compactación manual o mecánica)
- Tipo de instalación de tratamiento de lixiviados (en base a la superficie ocupada)

Recordemos la fórmula del volumen en geometría:

$V = \text{Área de la base (A)} \times \text{Altura (h)}$. Despejando a A, h pasa dividiendo al miembro de la izquierda, resultando:

$$A(m^2) = V(m^3) / h(m)$$

La altura de las celdas se establece previamente en función del estudio del terreno y la estabilidad de los residuos que viene dada principalmente por el nivel de compactación. A partir de la fórmula anterior, una vez establecida la altura total que alcanzarán las celdas o el relleno en su conjunto, se puede calcular el área requerida para depositar los residuos.

Para un relleno con compactación mecanizada, la superficie necesaria puede ser calculada con la siguiente fórmula:

$$\text{Arelleño} = \text{Vrelleño} / f \quad (4)$$

Donde:

A: Área que ocuparía la masa de residuos y la cobertura en hectáreas (ha)

V: Volumen necesario para el relleno (m³)

f: Factor Volumen/Área (Si la altura máxima del vertedero es de 15m: 150,000m³ ha (15m×10.000m²/ha))

Haciendo referencia a ejemplos de otros países, la altura de un nivel o terraza del relleno debe ser inferior o igual a 5 m y el número de niveles debe ser inferior o igual a 3. Por lo tanto, la altura total del relleno será de 15 m o menos. Sin embargo, si se puede demostrar que un relleno sanitario de más de 15 metros se puede estabilizar técnicamente, esto es aceptable.

Las celdas se calculan para un determinado tiempo de operación que dependerá del volumen de residuos esperado en cada relleno.

(2) Área para las instalaciones complementarias

Además del espacio destinado a la conformación de las celdas donde se depositarían los residuos, se requiere una superficie para la infraestructura complementaria necesaria para el funcionamiento y correcta operación del SDF. Estas obras auxiliares comprenden, principalmente:

- Vías de acceso y vías internas para el movimiento de vehículos.
- Caseta de vigilancia y control de acceso
- Balanza (si hay) y caseta de registro
- Verja o un cerco perimetral para delimitar el área total del SDF.
- Almacén de herramientas y materiales de uso
- Comedor e Instalaciones sanitarias para el personal
- Laboratorio para análisis de gas o agua (solamente en rellenos muy grandes).
- Oficinas e infraestructura administrativa (solamente en rellenos grandes)
- Taller de mantenimiento (solo en rellenos grandes)

El área requerida para las instalaciones complementarias se establece mediante un coeficiente (%) del área ocupada por las celdas.

Área de instalaciones complementarias = Coeficiente (%) del área de celdas

Este porcentaje es mayor a medida que el área del relleno es menor. Así, para SDF pequeños, se estima un 20 - 40 % del área destinada a las celdas; para los rellenos medianos, entre 10 – 20 %, y en los rellenos grandes, esta área se estima en menos del 10% del área de las celdas⁷. De todos modos, lo recomendable es hacer el cálculo, considerando el mapa topográfico de cada alternativa propuesta para la construcción del SDF y la descripción precisa de las obras auxiliares específicas con que contará el sitio.

Dado que es deseable estimar el área total del sitio de disposición final con un margen generoso en la etapa de diseño básico, se recomienda que el área de las instalaciones complementarias se estime como un 40% del área de la celda.

Por lo tanto, el área total de disposición final se puede estimar mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Área total SDF final} = \text{área de celdas} + \text{área de instalaciones complementarias} = 1.4 \times \text{área de la celda}$$

7. Fuente: Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios. Eva Röben. Loja, Ecuador 2002. Página 9.

5. DISEÑO DETALLADO DE UN RELLENO SANITARIO



Fuente: Equipo de expertos de JICA
 Foto 2: Relleno Sanitario Moyobamba, Perú

Una vez seleccionado el lugar donde se establecerá el SDF y se haya definido el diseño básico, se debe proceder al diseño detallado. En este Manual se recomienda contemplar como mínimo los siguientes elementos:

- Estudios detallados de topografía, geología, hidrología e hidrogeología del terreno donde se pretende construir el relleno sanitario.
- Diseño detallado de obras complementarias como cercas, casetas, talleres, caminos y otros.
- Sistema de recolección, drenaje y tratamiento de lixiviados, incluyendo obras hidráulicas de captación, conducción y almacenamiento.
- Sistema de recolección, ventilación, combustión o recuperación de gases (si hay aprovechamiento).
- Obras hidráulicas de desvío y canalización de aguas superficiales y de lluvias.
- Pozos de monitoreo de aguas subterráneas y gas.
- Determinación de los lugares para la excavación de los materiales de cobertura.
- Diseño de la superficie final de cierre del relleno y su impermeabilización con tierra arcillosa o con membranas sintéticas, incluyendo la capa de suelo para la plantación de la cubierta vegetal.

- Estudio de los costos, tanto de inversión como de operación, y análisis financiero de los ingresos y gastos o el análisis del flujo de efectivo
- Establecimiento de políticas de gestión, como la decisión de si la operación y construcción se llevarán a cabo a nivel municipal o privado.
- Establecimiento de normas de licitación, si procede, o del propio programa de gestión.
- Capacidad necesaria según la proyección de la generación
- Vida útil.
- Tipos de residuos a disponer. Composición y características.
- Método de operación (trinchera, área, rampa o combinado).
- Dimensiones de las celdas
- Impermeabilización de la base de la celda
- Análisis y control de la estabilidad del relleno
- Monitoreo ambiental durante la operación
- Cierre y uso posterior del sitio de disposición final

5.1 Nivel de construcción para sitios de disposición final nuevos

Las condiciones previas para el desarrollo de un nuevo sitio de disposición final, de acuerdo con los requerimientos de este Manual, son las siguientes:

- Debe estar contemplado dentro del Plan Nacional de Sitios de Disposición Final de Residuos Sólidos del MMARN.
- Debe ser compartido por tres o más municipios, salvo alguna disposición especial emitida por el MMARN, de acuerdo con lo establecido en el Art. 133 de la Ley 225-20.
- Debe ser un relleno mecanizado (por las razones expuestas en el capítulo 2.1.1).

Existen cuatro niveles de desarrollo de un sitio de disposición final nuevo. El MMARN, en base a las instalaciones de disposición final nuevas que se requerirán en la República Dominicana en el futuro, teniendo en cuenta el PNSDF, decidió un nivel 4 para el desarrollo de nuevos SDF. Los componentes que deben tener los nuevos SDF, en concordancia con el nivel seleccionado, se pueden observar en la Tabla 4:

Tabla 4: Instalaciones a ser implementadas en SDF nuevos

Componente	Descripción	Condiciones de instalación
Instalación para la gestión del transporte de residuos	Instalación de una oficina de gestión, báscula para camiones, lavaderos de vehículos, etc. para gestionar el transporte de residuos.	a
Muro de tierra o banquina Talud	Cerrar con un terraplén para evitar la propagación desordenada de la zona del relleno.	a
Zona de amortiguamiento	Plantar árboles alrededor del sitio como zona de amortiguamiento.	a
Material de cobertura	Después de compactar los residuos, cubrirlos con tierra para evitar incendios y olores.	a
Instalaciones de ventilación de gas	Instalación de tubos de ventilación de gas para evitar incendios y explosiones.	a
Camino de acceso/Vía de transporte	Con el fin de asegurar una ruta de transporte estable, construir un camino de acceso desde el exterior y un camino de transporte hacia el interior del sitio.	a
Instalación de recolección y drenaje de aguas pluviales	Implementar una instalación de recolección y drenaje de aguas pluviales alrededor del sitio para controlar la entrada de aguas pluviales.	a
Instalación de recogida y drenaje de lixiviados	Implementar una instalación de recolección y drenaje de lixiviados (tuberías, depósito regulador) para descargar rápidamente los lixiviados generados por los residuos.	a
Sistema de impermeabilización	Instalar un sistema de impermeabilización compuesto de varias capas (revestimiento sintético, una capa de material) para evitar que los lixiviados penetren directamente en el suelo.	a
Cerco perimetral	Instalar una verja para evitar la entrada de animales y personas ajenas a la operación del sitio, además de mantener el control del área.	a
Instalación para la recirculación de lixiviados	Implementar una instalación para el tratamiento por circulación de los lixiviados y controlar su salida al exterior de la zona.	b
Instalación de tratamiento de lixiviados	Implementar una instalación de tratamiento de lixiviados para poder depurarlos y descargarlos.	b

Fuente: Equipo de expertos de JICA

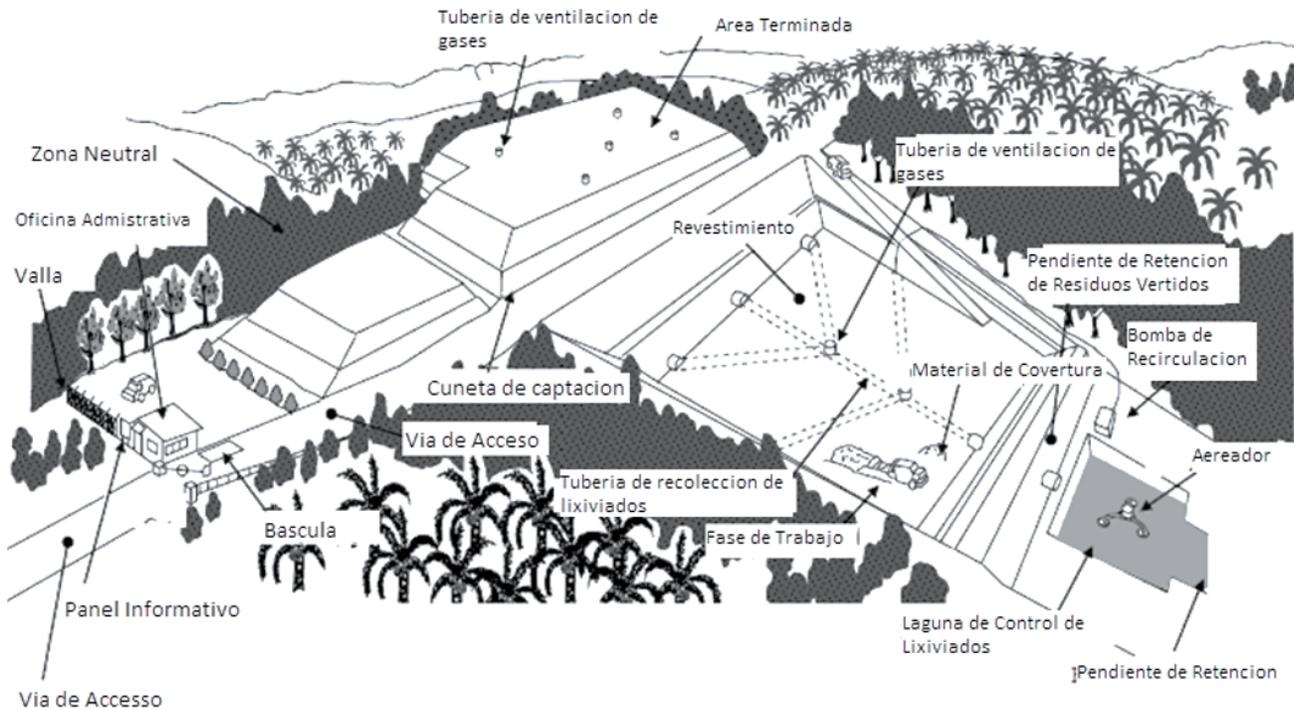
a: Instalaciones a implementar.

b: Instalaciones a ser seleccionadas e implementadas según el método de construcción y condiciones del sitio.

La tabla anterior muestra las instalaciones a ser implementadas en un nuevo SDF y su condición de instalación. Para las celdas de los SDF que serán rehabilitados, existe la posibilidad de que el MMARN apruebe un nivel de construcción entre el 1 y el 3, cuyos detalles se muestran en el Manual para Cierre y Rehabilitación de SDF.

Entre las instalaciones a desarrollar en el nivel 4, el costo de construcción de las instalaciones de tratamiento de lixiviados varía mucho según se adopte el tratamiento por recirculación o el tratamiento de depuración, por lo que el método debe seleccionarse en función de las condiciones del sitio. Las demás instalaciones son las que deberían instalarse habitualmente en los sitios de disposición final nuevos.

En la Figura 14 se muestra una imagen de un sitio de disposición final de nivel 4.



Fuente: Guía técnica para el diseño y la operación de un vertedero, JICA 2004

Figura 14: Relleno sanitario con Nivel 4 de construcción

5.2 Elevación mínima de la parte inferior del SDF

Es importante fijar la elevación mínima de la parte inferior del SDF a una altura que no se vea afectada por las aguas subterráneas, y también teniendo en cuenta el nivel de agua máximo histórico (cota de inundación), sin detrimento de la distancia mínima de 3m desde la base de la celda al acuífero, como se mencionó anteriormente.

En este manual, se recomienda que la elevación mínima de la parte inferior del SDF se fije según se describe a continuación:

Nivel mínimo cota inferior = Cota histórica del agua + 50 cm.

5.3 Vida útil del relleno sanitario

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 de la obra depende de muchas variables, entre las que mencionamos las siguientes:

- Volumen disponible del mismo
- La cantidad de residuos sólidos a disponer
- Método de operación

Para determinar la vida útil, se debe comparar el volumen proyectado de recepción de residuos en el sitio (volumen de residuos sólidos urbanos más material de cobertura) a lo largo de los años, con el volumen total acumulado que se depositaría en las celdas proyectadas, durante la etapa de diseño dentro del área de disposición final; hasta encontrar un valor similar, ligeramente superior o inferior. Este valor corresponde a la vida útil del relleno en años.

La vida útil vendría determinada por la topografía y las dimensiones del suelo, la cantidad de residuos a depositar, la altura de las celdas y el grado de compactación de los residuos ya depositados.

En los casos en que se dispone previamente de un terreno, el cálculo de la vida útil se puede realizar según se detalla a continuación⁸:

$$n = A_t / F * A_c$$

Donde:

n = Número de celdas

F = Factor para áreas adicionales de 1.2 a 1.3

A_t = Área del terreno (m²)

A_c = Área de la celda (m²)

Entonces la vida útil⁹ estará dada por:

$$V_u = t_z * n / 365$$

De donde:

V_u = Vida útil del terreno (años)

t_z = Tiempo de servicio de la celda (días)

Una vez que se haya determinado la vida útil del SDF, habrá que detallar más el proyecto. Para ello es importante determinar la cantidad y la altura de las celdas a construir. La altura de las celdas viene determinada por el tipo y la calidad de la compactación del relleno que se va a construir.

Se recomienda un tamaño de celda equivalente a la superficie necesaria para recibir los residuos generados en un año, cuyo tamaño sea el doble de la anchura del tractor, para facilitar la operación.

5.4 Diseño de las instalaciones principales

Cada instalación destinada para relleno sanitario tiene características únicas que solo pueden ser aprendidas mediante el estudio, la experiencia y el continuo entrenamiento. La gestión adecuada de un SDF es una actividad muy compleja, que requiere que desde su diseño sean consideradas para cada proceso de la disposición final. A continuación, se detallan las instalaciones principales objeto de un SDF

5.4.1 Instalación de control y pesaje de vehículos entrantes

La instalación de control de vehículos entrantes tiene la función de gestionar adecuadamente la cantidad (peso) y la calidad de los residuos aceptados por el SDF, así como de supervisar y confirmar que los residuos entregados son adecuados para su disposición en ese SDF. El diseño del área de entrada deberá ser adecuado para la logística que requieren este tipo de instalaciones, permitiendo la maniobra de los camiones y equipos pesados que circularán de manera constante.

8. Fuente: Guía para el diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de rellenos sanitarios. Bolivia 2012, Pág. 72 -73.



Fuente: Peñaloza, H. (s. f.). Diseño y Operación de Rellenos Sanitarios (3.a ed.). Escuela Colombiana Julio Garavito
Figura 15: Distribución área de entrada del SDF

5.4.1.1 Selección de la báscula y número de básculas a instalar

A la hora de seleccionar el tipo de báscula y decidir el número de unidades a instalar, es necesario investigar a fondo los tipos y especificaciones de los vehículos de entrega y las condiciones de entrega de los residuos. El número total de vehículos de recolección por día, los sistemas de recolección de residuos sólidos y el número máximo de vehículos de recolección en las horas pico de entrega son factores que deben considerarse antes de decidir el número de básculas que se instalarán en un SDF. En particular, si la báscula puente está situada cerca de la vía pública, se considerará el número máximo de vehículos de recolección en horas pico a intervalos de 15 a 30 minutos.

La instalación de la báscula requerirá una obra civil mínima que debe ser recomendada por un ingeniero estructural en función de: la capacidad máxima de la báscula a instalar, la capacidad portante del suelo donde se instalará y la logística de entrada y salida de los vehículos a pesar.

La capacidad máxima de pesaje de la báscula deberá ser varias veces superior al peso total del vehículo de recolección (con la carga incluida), con el fin de proporcionar suficiente margen/espacio para los vehículos de recolección que ingresen inusualmente pesados.

La ubicación responderá al lugar estratégico por donde pasen los vehículos al entrar y salir del sitio.



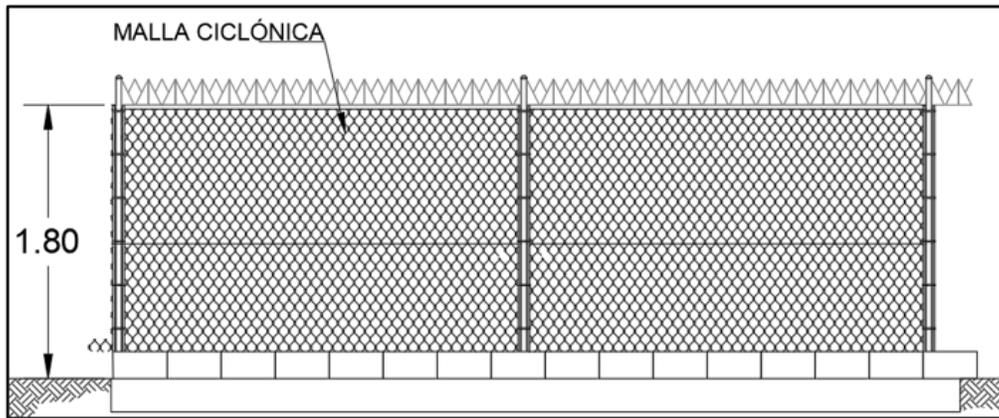
Fuente: Manual Fase I FOCIMIRS

Foto 3: Báscula Puente relleno sanitario ASINORLU con registro de peso computarizado, El Salvador. -

5.4.2 Instalación de puerta de acceso y verja perimetral

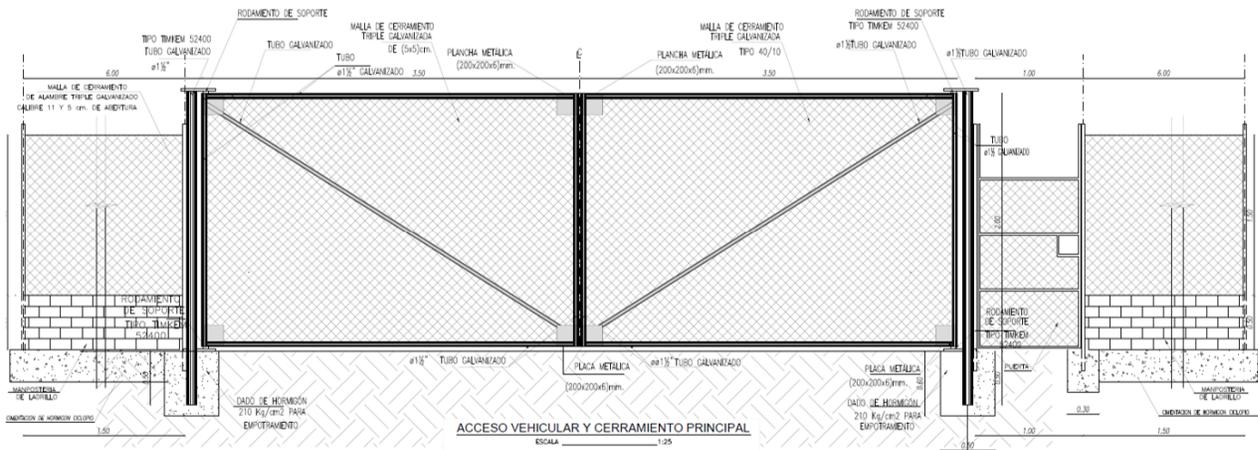
La puerta de acceso y la verja perimetral constituyen barreras físicas que impiden el libre acceso de personas ajenas al SDF. Adicionalmente, la verja delimita todo el perímetro del SDF. Su altura es de aproximadamente 1,80 m sobre el suelo, y suele construirse de eslabones galvanizados sobre un muro de mampostería corto (0,20 - 0,40 m).

Levantar una verja perimetral ayuda a limitar que se lleven residuos de manera ilegal, así como a evitar la entrada de animales. Además, es adecuado instalar una verja biológica de árboles de gran altura y gran consumo de agua para evitar los malos olores y, aumentar la posibilidad de que atrapen cierta cantidad de agua en sus raíces (y prevenir que entre al SDF).



Fuente: Equipo de expertos de JICA

Figura 16: Esquema de una verja típica con malla ciclónica



Fuente: Diseño de un plan de Manejo Integral para los residuos sólidos en la MAGSD, Nippon Koei-Kokusai Kogyo, BID, 2013

Figura 17: Portón de acceso vehicular típico de un SDF

5.4.3 Instalación de un letrero o cartel de señalización

Un letrero o cartel de señalización, es un dispositivo de información que se instala sobre un portón de acceso o cerca de las entradas u otras áreas donde la gente debe detenerse, el cual permite identificar el lugar en cuestión, en este caso, el SDF. Además, este cartel debe indicar los datos de la empresa o municipio a cargo de la operación y un contacto, así como la necesidad de registrarse a la entrada sin excepción.

5.4.4 Diseño de las celdas para depósito de los residuos

En los conceptos básicos de este manual se describen la celda y la celda diaria. Las principales ventajas de construir celdas son las siguientes:

- Optimiza el control de las emisiones
- Minimiza la producción de lixiviados
- Minimiza el riesgo de formación de bolsas de gas
- Facilita la compactación más homogénea de la masa residuos
- Favorece un manejo de residuos más adaptado a las condiciones de cada momento
- Minimiza el riesgo de incendios
- Agiliza el inicio de la fase metanogénica
- Facilita el acceso y movilidad de los vehículos para descargas posteriores

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. Como “la celda” se ha definido como la infraestructura principal de un relleno sanitario, el cálculo de su volumen es parte esencial del diseño de un SDF.

El volumen de las celdas diarias depende del área total del relleno, de la cantidad de residuos sólidos que requieren disposición, del equipo empleado y del material de cobertura. Sus dimensiones se definen teóricamente como un paralelepípedo donde los elementos básicos son altura, longitud, ancho y taludes e inclinación.

Generalmente, en una celda se construyen celdas diarias de trabajo donde, al terminar cada jornada, los residuos quedan cubiertos y aislados evitando molestias de olores, residuos dispersos, esparcimientos, acceso y contacto de animales con los residuos, presencia de insectos y roedores, etc; mejorando las condiciones sanitarias del relleno y del entorno. Como se ha indicado anteriormente, si la cobertura diaria no es factible, debe realizarse al menos tres veces por semana².

El diseño de la celda se fundamenta en las dimensiones de diseño de las celdas diarias. Las fórmulas de cálculo que aparecen a continuación se refieren a la celda diaria, tal y como definida previamente:

(1) Altura

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

(2) Ancho

El ancho de la celda diaria o 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 maquinaria⁹. Para el cálculo del ancho se puede emplear la formula siguiente:

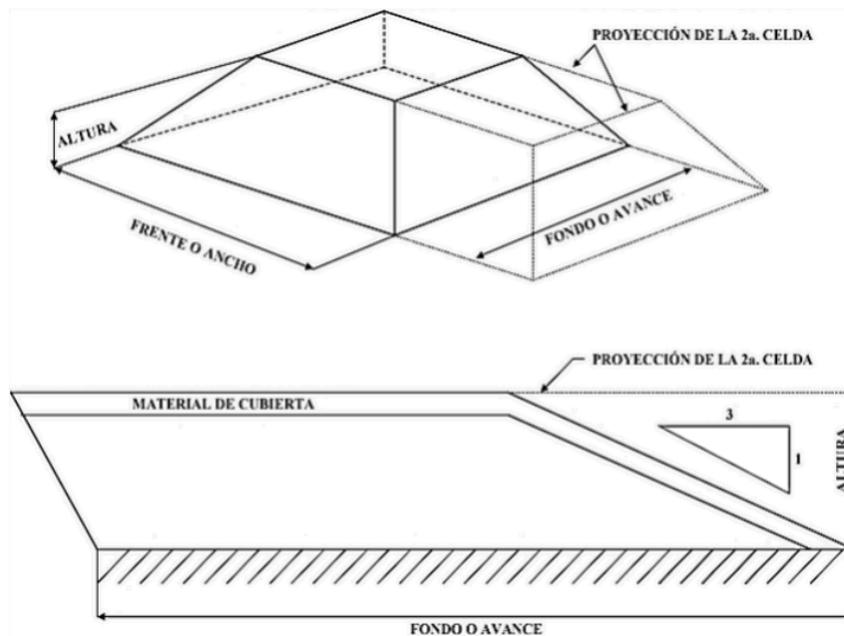
$$F = \sum_{i=1}^n (Xi)^2$$

Siendo,

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 el método de trinchera existe únicamente un frente de trabajo. En el método de área y combinado pueden existir dos frentes de trabajo.



Fuente: Guía para el Diseño, Construcción, Operación, Mantenimiento y Cierre de Rellenos Sanitarios, Bolivia, 2012, con fuente en la Guía de diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de rellenos sanitario mecanizado, Sandoval L, Perú.

Figura 18: Elementos de una celda

(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 (V:H) o viceversa (H:V). Se recomienda que las celdas tengan un talud máximo de 3:1 (relación H:V), es decir, que al avanzar 3 metros horizontalmente, se suba 1 metro verticalmente. (SEDUE, 1984).

Los taludes de finalización de cada celda tendrán una pendiente que facilite las tareas de compactación asegurando a su vez la estabilidad de este, reducir el riesgo de producirse fallas en los taludes y el mantenimiento a largo plazo.

En el Manual de Operación de SDF se presentan las técnicas recomendadas para la conformación de los taludes durante la operación del relleno sanitario.

(4) Longitud

La longitud (fondo o avance) está definida por la cantidad de residuos que llega al relleno en un día, aunque se debe jugar con estas dimensiones y la relación largo/ancho para perseguir siempre una superficie cuadrada para homogeneizar el comportamiento de los residuos en el interior y minimizar las necesidades de tierra de cobertura.

El largo se puede calcular usando la fórmula⁹ a continuación, siempre que se determinen previamente la altura y el ancho en la configuración trapezoidal de la celda diaria.

$$L = V / (A_c \times A_t)$$

Siendo:

L = Largo de la celda, en metros

V = Volumen de la celda, en metros cúbicos

A_c = Ancho de la celda, en metros

A_t = Altura de la celda, en metros

(5) Volumen

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

$$V_c = (G_t / D) * M_c$$

Donde:

V_c = Volumen de la celda diaria, en m³

G_t = Cantidad media de residuos sólidos que llegan al relleno sanitario, en (kg)

D = Densidad de los residuos sólidos

M_c = Factor de material de cobertura (1.3)

(6) Área

$$A_c = V_c / h_c$$

Donde:

A_c = Área de la celda (m²/día)

h_c = Altura de la celda (m)

5.4.5 Diseño del muro de contención o banquina

Un dique o banquina es una estructura formada por suelo nativo compactado. Se coloca alrededor de una gran capa de residuos para mejorar la estabilidad estructural y contención de la celda de vertido. La forma de la(s) celda(s) dependerá(n) de la topografía del terreno previsto para ese uso. Lo más importante es que el diseño asegure la estabilidad del conjunto. Es importante tener en cuenta que el material biodegradable, la humedad y la pérdida de material por causa de su descomposición, disminuirán la estabilidad de la masa de residuos. Los taludes de la celda, se deben conformar de tal manera que no causen erosión y puedan darle buena estabilidad a la masa de residuos luego de su clausura.

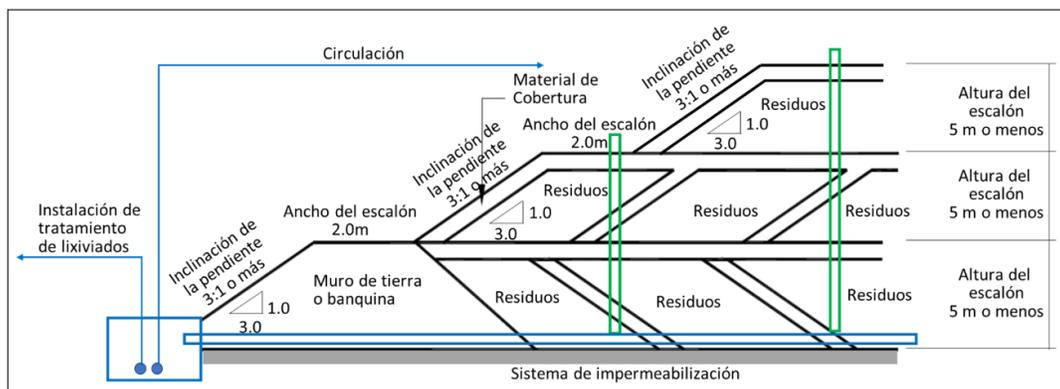
El objetivo del muro de contención en la celda es evitar el derrame y colapso de los residuos depositados. Permite cumplir las siguientes funciones básicas:

- Delimitar el área destinada a la celda
- Almacenar de forma segura la cantidad de residuos prevista para el vertido
- Evitar la escorrentía de los lixiviados y del agua de percolación
- Almacenar temporalmente el agua de lluvia

Las instalaciones de contención de residuos deben tener una resistencia suficiente para cumplir las funciones indicadas anteriormente, y deben diseñarse considerando la combinación de aspectos financieros y de seguridad. No se debe utilizar un terreno demasiado inclinado para no arriesgar la seguridad estática de la masa de residuos que podría caerse completamente o parcialmente.

Según se ha indicado en el acápite 4.4, la altura de un nivel o terraza del relleno debe ser inferior o igual a 5 m y el número de niveles debe ser inferior o igual a 3. Por lo tanto, la altura total del relleno será de 15 m o menos. Sin embargo, si se puede demostrar que un relleno sanitario de más de 15 metros puede estabilizarse técnicamente, esto será aceptable.

Se recomienda que la relación de las pendientes del relleno sea igual o más gradual que 3:1 (horizontal: vertical), pero si las limitaciones del sitio lo dificultan, pendientes más pronunciadas serían aceptables siempre que se pueda demostrar que son técnicamente factibles de estabilizar.

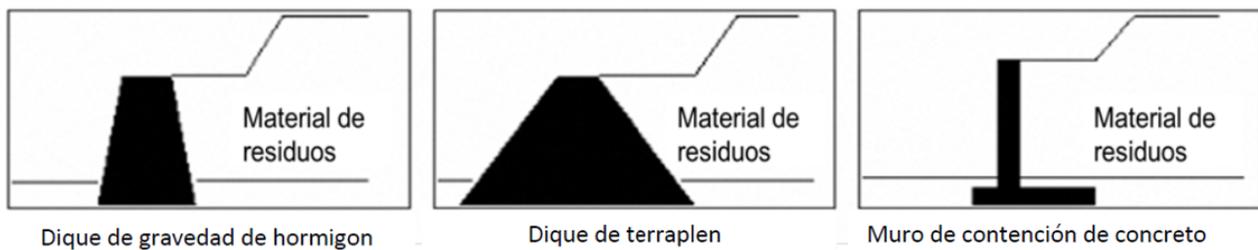


Fuente: Modificado por el Equipo de expertos de JICA

Figura 19: Esquema del muro de contención o banquinas tipo terraza

5.4.5.1 Tipo de estructuras de contención

Las estructuras de contención en general se pueden clasificar en tres tipos: diques de gravedad de concreto u hormigón, diques de terraplén y muros de contención de concreto (Figura 20). Los diques de concreto por gravedad y los diques de terraplén se pueden utilizar para almacenamiento a gran escala, y los muros de contención se utilizan básicamente para almacenamiento a pequeña escala. Además, al seleccionar el tipo y diseño de la estructura, la decisión debe tener en cuenta el estado de cimentación del terreno. Cada estructura tiene unas condiciones de diseño y unas cargas diferentes en función de su finalidad. Por lo tanto, la estructura adecuada debe determinarse teniendo en cuenta las condiciones topográficas de la zona circundante, la capacidad de carga de residuos según el plan del relleno y las condiciones del suelo. En la fase de planificación, hay que comparar y examinar varios tipos de estructuras de contención. En la fase de diseño detallado, es importante volver a confirmar si la estructura seleccionada en la fase de planificación es la más práctica y adecuada.



Fuente: Página web de NPO/LSA: Asociación Japonesa de Sistemas de Rellenos e Investigación Tecnológica.

Figura 20: Principales tipos de estructuras de contención.

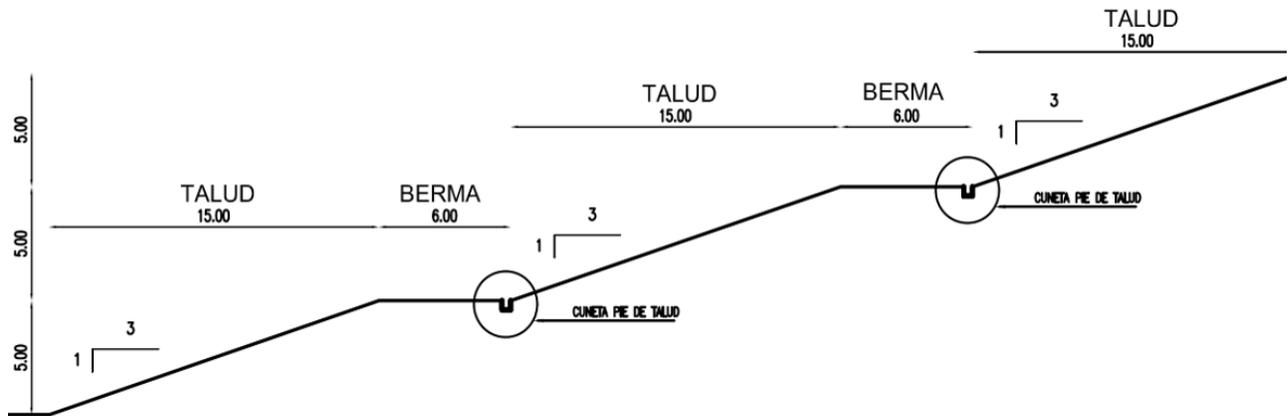
Al diseñar una estructura de contención, se puede asumir que las principales cargas aplicadas serán el peso de la estructura en sí, la presión de los residuos, así como la carga generada por las vibraciones sísmicas. Dado que la carga aplicada a la estructura de contención dependerá de las características del área de disposición final (dimensión del relleno, características de los residuos, vida útil del relleno, topografía, geología, etc.), se necesita evaluar cuidadosamente las condiciones arriba mencionadas.



Fuente: Equipo de expertos de JICA, Rehabilitación Vertedero Azua, RD. 2017.-

Foto 4: Proceso de instalación de un dique de terraplén para una celda. -

En países vecinos, se suele adoptar la estructura de terraplén porque es económica y fácil de construir, y su altura suele fijarse en unos 5 metros. La relación de la pendiente del terraplén de tierra debe ser de 3:1 (horizontal: vertical) para garantizar la estabilidad del talud.

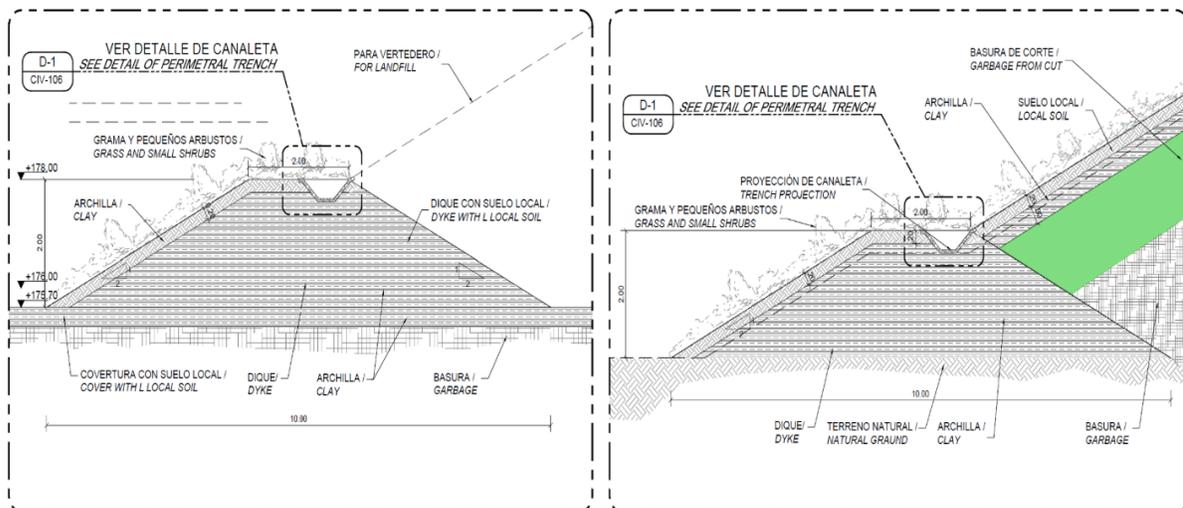


Fuente: Fuente: Diseño de un plan de Manejo Integral para los residuos sólidos en la MAGSD, Nippon Koei-Kokusai Kogyo, BID, 2013

Figura 21: Ejemplo conformación recomendada de los niveles o terrazas

Sus dimensiones deben ser las siguientes:

- Ancho superior: Un mínimo de 2 m o según lo requiera el equipo de compactación para permitir el paso durante la actividad de compactación.
- Pendientes laterales: 3:1 H: V o más plana, según lo requiera el suelo utilizado para conformarla.
- Altura: 5 m como máximo.



Fuente: Equipo de expertos de JICA, Diseño Rehabilitación Vertedero Moca, RD. -

Figura 22: Instalación de banqueta en área de residuos (izquierda) y banqueta en la base (derecha)

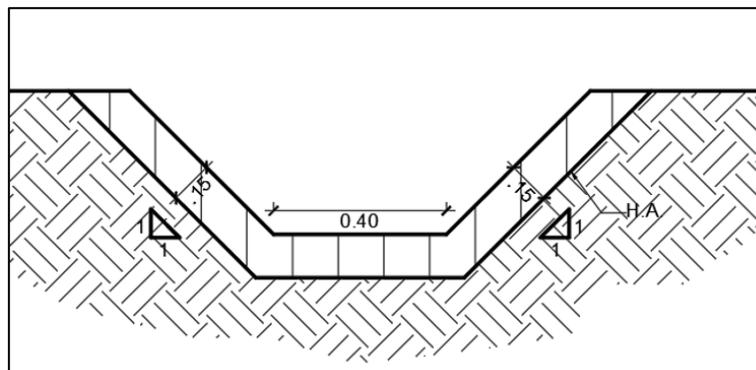
5.4.6 Diseño de instalaciones para recolección y drenaje de aguas pluviales

El objetivo del sistema de recolección y drenaje de las aguas pluviales es limitar su infiltración al interior del volumen de residuos sólidos, para prevenir principalmente el aumento de líquidos lixiviados, la erosión del sellado o cobertura del relleno sanitario, así como el deterioro de los caminos de acceso y otras obras de infraestructura. 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. El manejo de los lixiviados supone un elevado costo, por lo que es muy importante tratar de minimizar su generación.

La función primordial de las instalaciones de recolección y drenaje de aguas pluviales es captar rápidamente las aguas pluviales que caen sobre el SDF y permitir que se drenen fuera de las celdas. Además, sirven para reducir el volumen de lixiviados que se generaría, al evitar que gran parte del agua de lluvia se quede en el relleno. Por ello, se deben construir drenajes pluviales internos y externos en el perímetro del área.

Dependiendo de la topografía y de otros factores, la mayor parte o parte del agua de lluvia de una cuenca hidrográfica donde se localice un relleno, suele fluir hacia el mismo. Este volumen de agua es mucho mayor que el volumen de lixiviado generado en el relleno, y si esta agua fluye hacia el relleno, la instalación de tratamiento de lixiviados tendrá que tratar un mayor caudal con fluctuaciones irregulares de volumen y calidad. Además, el aumento de los lixiviados puede aumentar la carga sobre el revestimiento inferior del relleno. Para evitarlo, es necesario separar y drenar las aguas pluviales que caen alrededor del SDF, utilizando canaletas de drenaje, en el perímetro del mismo.

Un sistema de drenaje consiste en las instalaciones (zanjas, generalmente) para la correcta gestión de la escorrentía del agua de lluvia. Se instala alrededor de las vías de mantenimiento y de la masa de residuos para reducir la generación de lixiviados. Las dimensiones de las zanjas deben ajustarse a los cálculos hidráulicos, pero siempre deberán mantener un ancho mínimo del fondo de 0,40 m para facilitar la construcción, así como la limpieza durante la operación.

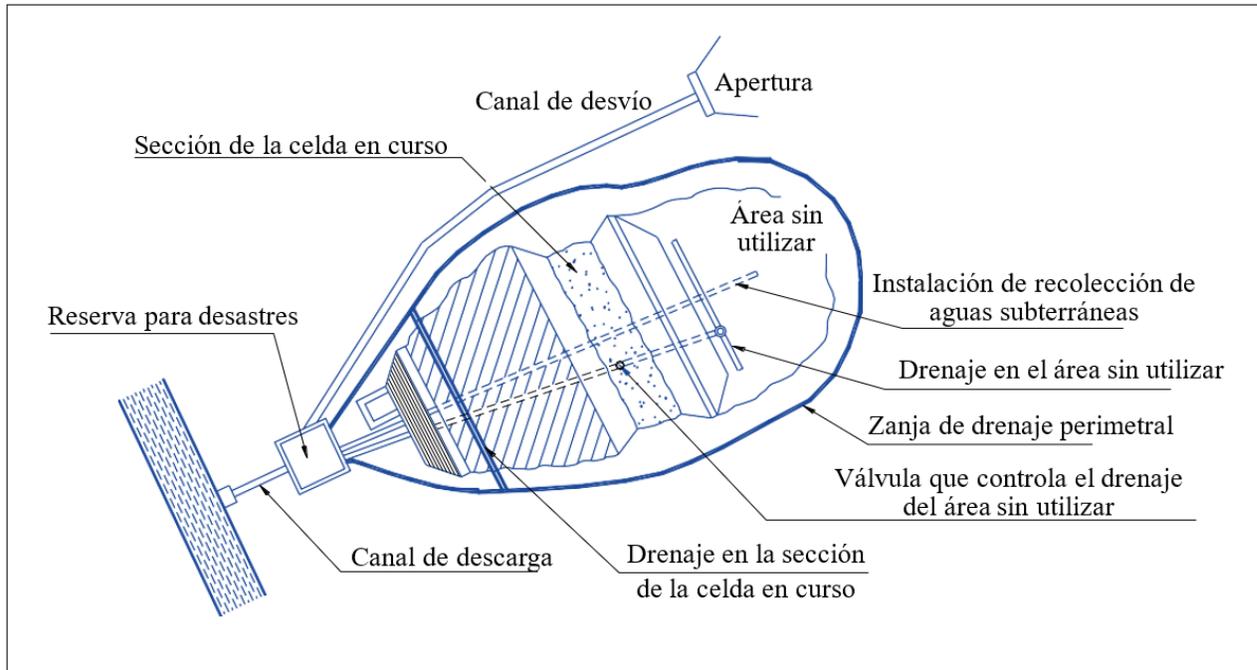


Fuente: Equipo de expertos de JICA

Figura 23: Detalle de la sección típica de la zanja de drenaje.

Los canales de aguas pluviales internos, serán construidos en los taludes internos de la masa de residuos después de haber instalado la cubierta final de sellado. 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 del SDF; por lo general deben tener una pendiente mínima del 2%.

Estos canales deben garantizar que las aguas procedentes de la lluvia que escurren sobre la superficie de cubierta final no producen erosión excesiva o filtración. El mayor riesgo está en el estancamiento de las aguas en zonas de asentamiento del terreno. La zanja de coronamiento o canal perimetral se construye fuera de la masa de residuos, en el área perimetral del SDF, sobre suelo natural.



Fuente: Guías para la planificación, diseño y gestión de sitios de disposición final, Asociación de Gestión de Residuos del Japón, 2010

Figura 24: Diagrama conceptual instalaciones de recolección y drenaje de aguas pluviales

Según su ubicación, las instalaciones para drenaje de aguas pluviales tendrán diferentes usos, siendo los principales:

(1) Zanja de drenaje perimetral

Se trata de una zanja de recolección y drenaje instalada en la periferia del SDF antes del inicio de las operaciones de vertido. Su objetivo es recolectar el agua de lluvia de los alrededores del sitio y evitar que fluya hacia él. La pendiente longitudinal del canal depende de las condiciones topográficas, pero generalmente se encuentra en el rango de 1-2%. En pendientes pronunciadas y zonas onduladas, es probable que se produzcan socavaciones y desbordamientos debido a la rapidez del flujo y a la curvatura, por lo que hay que tener en cuenta cada situación al diseñar el canal. Los tipos más comunes de estructuras de canales utilizados son los canales de hormigón in situ, los canales en forma de U y los canales corrugados.

(2) Zanja de drenaje en la sección de la celda

Hay dos tipos de drenajes: El drenaje en la sección de la celda en uso y el drenaje en el área sin utilizar del. Son instalaciones que retiran el agua de lluvia del relleno sin dejar que entre en contacto con los residuos.

El drenaje de la sección de la celda se utiliza para el drenaje de la superficie después de cubrirla con tierra, mientras que el drenaje del área sin utilizar se usa para drenar el agua de lluvia que cae en el área sin intervención fuera de la celda, sin que entre en contacto con los residuos. En la mayoría de los casos, las zanjas de captación de los rellenos son alcantarillas, y se utilizan tubos de hormigón, tubos de resina sintética, tubos corrugados, etc.

(3) Zanja de drenaje superficial del relleno

Se trata de una zanja de drenaje para eliminar las aguas superficiales del relleno clausurado, una vez realizada la cobertura final del suelo. Para proporcionar una estructura que pueda hacer frente a la gran cantidad de hundimiento de la masa de residuos que se produce paulatinamente después de completar el período de vertido, se puede utilizar una estructura simple de zanjas en tierra al principio, y se pueden instalar zanjas de hormigón después de que el hundimiento haya disminuido en cierta medida.

(4) Canal de desvío aguas arriba

Este tipo de sistema de drenaje se utiliza cuando el área restante de una cuenca hidrográfica que incluye un relleno es demasiado grande para drenar el agua de lluvia de los alrededores con sólo una zanja de drenaje perimetral. Por lo general, se instala un pozo de monitoreo aguas arriba del relleno, y el agua fluye hacia abajo a través de la parte inferior del relleno, mediante tuberías. Otra alternativa es instalar un canal que atraviese todo el relleno.

5.4.6.1 Cálculos requeridos

El volumen de las aguas pluviales depende de la intensidad de las precipitaciones, el área de captación, la topografía y el uso del suelo. En general, se puede estimar el caudal a partir de la siguiente ecuación (Método Racional)¹⁰:

$$Q = 1/360 \times C \times I \times A$$

Donde:

Q = Caudal de aguas pluviales (m³/seg)

C = Coeficiente de flujo o escudriñamiento (Se define en función de la topografía de la zona de captación del SDF o de la vegetación, etc.)

I = Intensidad de la lluvia (mm/h) (El intervalo recomendado de recurrencia de tormentas es igual a la vida útil del SDF).

A = Área de captación (Área del SDF en ha)

NOTA: En esta ecuación se divide entre 360, como factor de conversión de horas a segundos, de modo que el resultado de Q se exprese en (m³/seg).

10. Existen otros métodos de cálculo que podrán presentarse al MMARN con el soporte requerido.

La intensidad de las precipitaciones debe basarse en los datos pluviométricos de años anteriores. El intervalo recomendado de recurrencia de tormentas es igual a la vida útil del SDF.

El coeficiente de flujo se puede encontrar en las normas de diseño y construcción del MOPC (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones), como se muestra en la tabla siguiente.

La Tabla 5 y Tabla 6 muestran el coeficiente de flujo por proporción de área urbana y por uso de suelo.

Tabla 5: Coeficiente de flujo o escurrimiento por proporción de área urbana

% de Área Construida	Coeficiente de Escurrimiento
90	0.85
85	0.80
80	0.75
75	0.70
70	0.65
65	0.60
60	0.55
55	0.50
50	0.45

Fuente: Reglamento para el diseño y la construcción de instalaciones sanitarias en edificios R-008, MOPC, República Dominicana 2010.

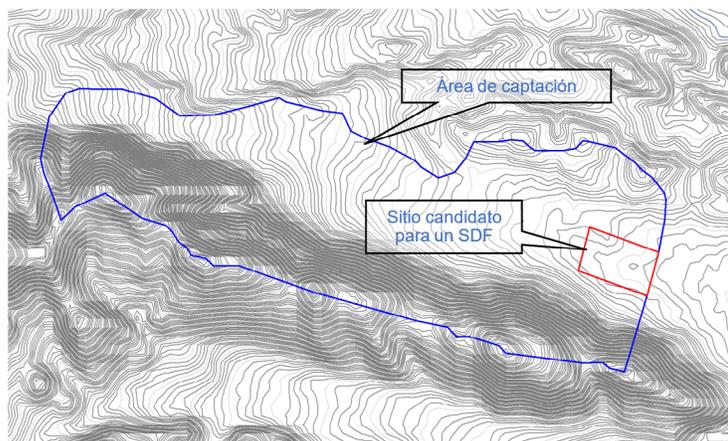
Tabla 6: Coeficiente de flujo o escurrimiento por uso del suelo

Características Áreas Construidas	Coeficiente de Escurrimiento
Superficie asfáltica	0.70 a 0.95
Superficie de hormigón	0.75 a 0.95
Superficie metálica	0.90 a 0.95
Suelo arenoso:	
Pendientes menores del 2%.	0.05 a 0.10
Pendientes entre el 2 y el 7%.	0.10 a 0.15
Pendientes mayores del 7%.	0.15 a 0.20
Suelo firme:	
Pendientes menores del 2%.	0.13 a 0.17
Pendientes entre el 2 y el 7%.	0.18 a 0.22
Pendientes entre el 2 y el 7%.	0.25 a 0.35

Fuente: Reglamento para el diseño y la construcción de instalaciones sanitarias en edificios R-008, MOPC, República Dominicana, 2010

(1) Determinación del área de captación o aporte

Para calcular la esorrentía de aguas pluviales, se debe establecer el área de captación o aporte. El área de captación se puede determinar interpretando un mapa topográfico de área amplia. La siguiente Figura 25 muestra un ejemplo de configuración de un área de captación.



Fuente: Procesado por Equipo de expertos de JICA con base en mapas topográficos proporcionados por LMD.

Figura 25: Ejemplo de establecimiento de un área de captación

(2) Cálculo de la intensidad de Lluvia

La intensidad de las precipitaciones se puede calcular a partir de los datos históricos de precipitaciones diarias mediante el método de Mononobe. Los datos históricos de precipitaciones diarias están disponibles en la Oficina Nacional de Meteorología (ONAMET):

$$R_t = R_{24} / 24 (24/T)^{2/3}$$

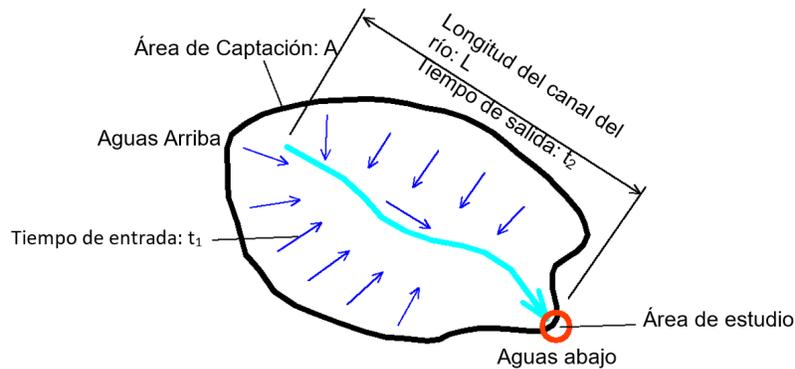
Donde

R_t = Intensidad de lluvia promedio (mm/hr)

R_{24} = Precipitación diaria (mm/día)

T = Tiempo de concentración (hr)

El tiempo de concentración (T) se calcula como "tiempo de entrada (t_1) + tiempo de salida (t_2)": **Tiempo de entrada (t_1)**: Es el tiempo que transcurre desde el momento que el agua de lluvia del área de captación fluye hacia un río. **Tiempo de salida (t_2)**: Es el tiempo que transcurre desde el momento que el agua de lluvia fluye por el cauce o lecho de un río. Se calcula utilizando el método de Kraven.



El cálculo del tiempo de entrada se basará en lo siguiente.

- Si el área de captación es inferior a 2 km², consulte la siguiente tabla:

Topografía del área de captación	Tiempo de entrada (min)
Área montañosa	30
Área de pendiente pronunciada	20
Área mejorada por alcantarillado	30

- Si el área de captación es de 2 km² o más, el cálculo se basa en la siguiente fórmula:

$$t_1 = \sqrt{A} / \sqrt{2} \times 30 \text{ (min)}$$

Donde

t_1 = Tiempo de entrada

A = Área de captación (km²)

- El tiempo de salida se calcula usando el Método Rziha cuando la pendiente del lecho del río es más pronunciada que 1/20 (5%), y el Método Kraven cuando la pendiente del lecho del río es menor que 1/20.

a) Método Rziha:

$$t_2 = L / W$$

Donde,

t_2 = Tiempo de salida (s)

L = Longitud del cauce del río desde el extremo aguas arriba del área de captación hasta el punto de estudio (m).

W = $72 \times I^{0.6}$ (Velocidad de propagación de la inundación (m/s)).

I = h / L (Gradiente del cauce del río desde el extremo aguas arriba del área de captación hasta el punto de estudio).

h = Diferencia de elevación desde el extremo aguas arriba del área de captación hasta el punto de estudio (m).

b) Método Kraven

$$t_2 = L / W$$

En función del valor de la pendiente del cauce I, obténgalo de la siguiente tabla.

I	1/100 o más	1/100 ~ 1/200	1/200 o menos
W	3.5 m/s	3.0 m/s	2.1 m/s

Donde,

t_2 = Tiempo de salida (s)

L = Longitud del cauce del río desde el extremo aguas arriba del área de captación hasta el punto de estudio (m)

W = Velocidad de propagación de la inundación (m/s)

(3) Determinación del área de la sección transversal

La sección transversal de un canal de drenaje o cuneta de aguas pluviales, suele ser rectangular o trapezoidal, en especial esta última es de mayor uso en los rellenos sanitarios porque es la más fácil de construir. El canal debe ser trazado por la curva de nivel más alta a la que llegará el borde del relleno sanitario y deberá garantizar una velocidad que no provoque erosión excesiva; el tamaño de la sección del canal se podrá calcular usando la siguiente ecuación:

$$S = Q/V$$

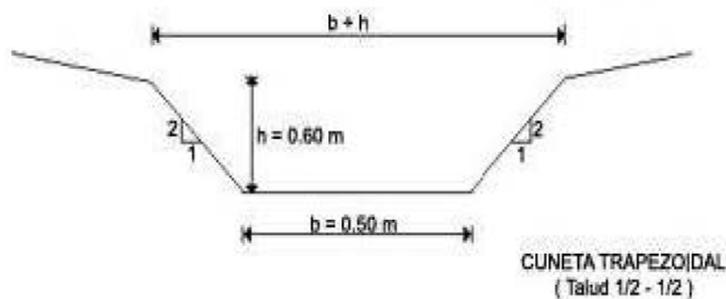
Donde,

S = Área o Superficie de la sección transversal del flujo (m²)

Q = Volumen de descarga (m³/seg)

V = Velocidad media del flujo (m/seg)

Al determinar el área de la sección transversal, es aconsejable diseñar con una sección transversal generosa en consideración a la acumulación de sedimentos. Aunque referido específicamente al diseño pluvial para infraestructuras viales, el Reglamento R-019 de MOPC indica que, para las cunetas trapezoidales, la profundidad de 0.60 metros porque se obstruyen con menos frecuencia que las de profundidad menor. La pendiente longitudinal mínima será del 2%. En las normas japonesas, el 80% de la profundidad del canal se calcula como sección transversal de paso.



Fuente: R-019 MOPC

Figura 26: Modelo sección transversal para el drenaje pluvial

La **velocidad media del flujo** puede calcularse utilizando la ecuación de Manning de la siguiente manera:

$$V = 1/n R^{2/3} T^{1/2}$$

Donde,

V = Velocidad media del flujo (m/seg)

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

T = Gradiente del canal

R = Radio hidráulico (m) = S/P

Donde,

S = Superficie de la sección transversal del flujo (m²)

P = Perímetro mojado (m)

El sistema de recolección y drenaje de lixiviados se instala sobre la superficie del sistema de impermeabilización del fondo y se extiende a lo largo del fondo y las pendientes laterales de cada celda de residuos del relleno. Se coloca inclinado para garantizar que los lixiviados fluyan hacia los colectores.

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. 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 DBO₅; como principal factor contaminante. Además de los dos citados, los lixiviados, contienen alto contenido de nitrógeno y fósforo, presencia abundante de patógenos e igualmente de sustancias tóxicas como metales pesados y constituyentes orgánicos.

La temperatura al interior del relleno se incrementa (hasta 50 - 70°C) debido al calor de la fermentación generado en las capas del relleno por la descomposición microbiana de los desperdicios. Como se muestra en la Figura anterior, en el método Fukuoka, la instalación de las tuberías de recolección/descarga provoca convección térmica debido a la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del relleno sanitario, con aire (oxígeno) fluyendo hacia adentro a través de las tuberías de recolección/descarga, en sentido opuesto al lixiviado que fluye hacia el pozo de recolección de lixiviados. Mantener las capas del relleno en estado semiaeróbico estimula la actividad de los microorganismos dentro de las capas, promoviendo la descomposición microbiana aeróbica.

Un sistema de recolección de lixiviados consta de 5 componentes principales¹¹:

- Capa de drenaje;
- Tubería de recolección;
- Colectores;
- Sistema de bombeo y elevación
- Manejo de lixiviados recolectados.

(1) Tubería de recolección inferior

Se compone de un tronco y un ramal, y se coloca en una pendiente para permitir el drenaje por flujo natural.

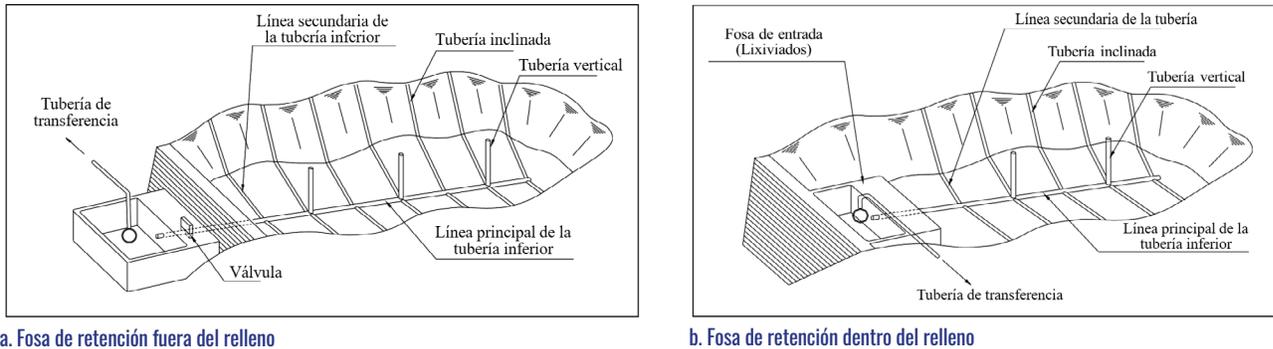
(2) Tubería inclinada

Se instala a lo largo del talud de la celda y se conecta a la tubería inferior. Además de la función de recolectar y drenar los lixiviados en la dirección vertical, que a menudo se ve obstruida por la cobertura intermedia del suelo, también funciona como una instalación del tratamiento de gases.

(3) Tubería vertical

Se trata de una tubería que recolecta y drena los lixiviados en sentido vertical, y que se conecta hacia arriba a medida que avanza el relleno. El extremo inferior de la tubería vertical se conecta a la tubería inferior. Al igual que la tubería de recolección y drenaje del talud. También funciona como instalación de tratamiento de gases.

En la Figura 28 se muestra un diagrama conceptual de la instalación de recolección y drenaje de lixiviados.



Fuente: Guías para la planificación, diseño y gestión de sitios de disposición final, Asociación de Gestión de Residuos del Japón, 2010

Figura 28: Concepto de instalación de recolección de lixiviados

(4) Fosas de retención (poza de captación) /almacenamiento de lixiviados y válvulas

La fosa de almacenamiento de lixiviados es una instalación para bombear los lixiviados recogidos en el extremo de una tubería, y puede estar situada dentro o fuera del relleno. Dado que la relación con el sistema de control de lixiviados es similar, el método a utilizar vendrá determinado por la topografía, las condiciones del lugar y la interacción con la instalación de tratamiento de lixiviados. También se conoce como cárcamo de bombeo de lixiviados.

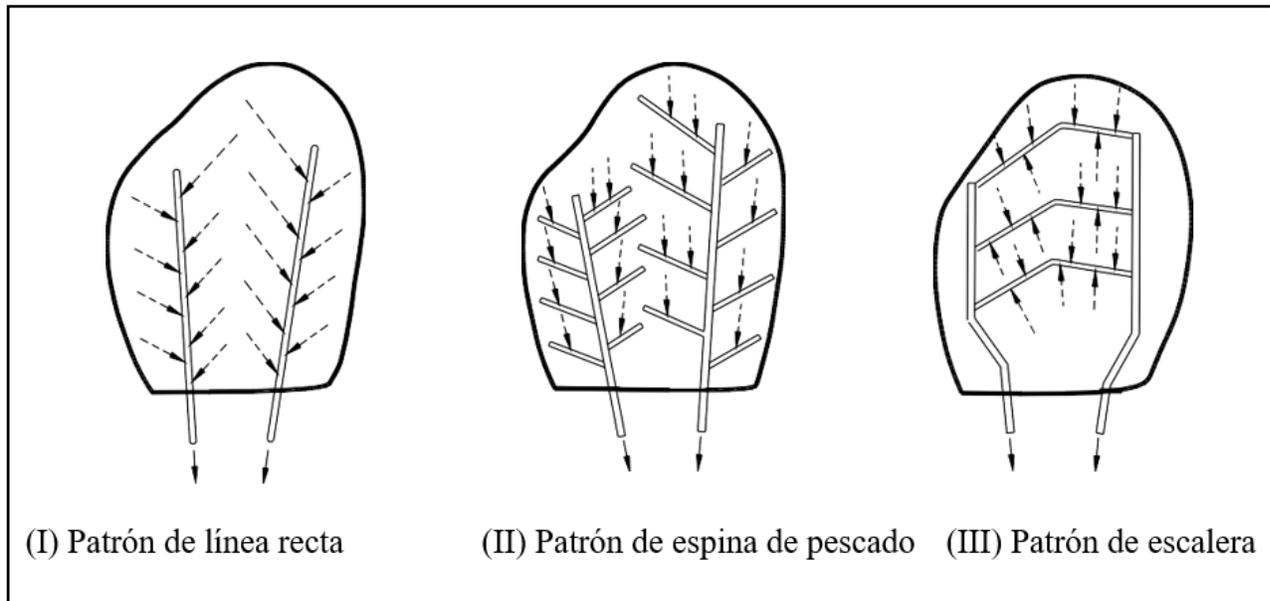
Se requiere una válvula cuando la fosa de retención de lixiviados se encuentra fuera del relleno. El flujo de lixiviados se regula mediante las válvulas. Las mismas se mantendrán e inspeccionarán periódicamente.

5.4.7.1 Diseño del sistema para recolección y drenaje de lixiviados

El diseño de la tubería inferior debe determinarse teniendo en cuenta la permeabilidad de los residuos, la permeabilidad de la geomembrana, la topografía y el tamaño del relleno, así como el hecho de que la instalación de recolección y drenaje de lixiviados también funcione como suministro de aire (caso de los rellenos semiaeróbicos construidos bajo el método Fukuoka).

En general, el intervalo de colocación de los tubos de fondo se determinará en función de la superficie de la celda, cuyos lixiviados se pretenda recoger y drenar. Para recolectar los lixiviados de forma eficaz y descargarlos rápidamente, es conveniente determinar el espaciado, teniendo en cuenta las características de cada relleno. Se recomienda que los ramales se instalen a intervalos de 20 m.

Las posibilidades de disposición de la tubería inferior se muestran en la Figura 29, dependiendo de la forma del relleno y del método de vertido:



Fuente: Guías para la planificación, diseño y gestión de sitios de disposición final, Asociación de Gestión de Residuos del Japón, 2010

Figura 29: Planos de disposición de la tubería inferior

- El patrón en línea recta consiste en uno o varios tubos de recolección y drenaje colocados en línea recta, y cuando la anchura del fondo de la celda es amplia, se aumenta el número de tubos colocados, según sea necesario.
- En el modelo de espina de pescado, las líneas de derivación están conectadas a la línea principal. Dado que los lixiviados se recogen en la línea troncal, pueden adoptarse múltiples patrones de espina de pescado para los rellenos sanitarios grandes.
- El patrón de escalera se utiliza a menudo en rellenos planos donde es difícil obtener una pendiente transversal.

En general, se utilizan los siguientes materiales para las tuberías de recolección y drenaje de lixiviados:

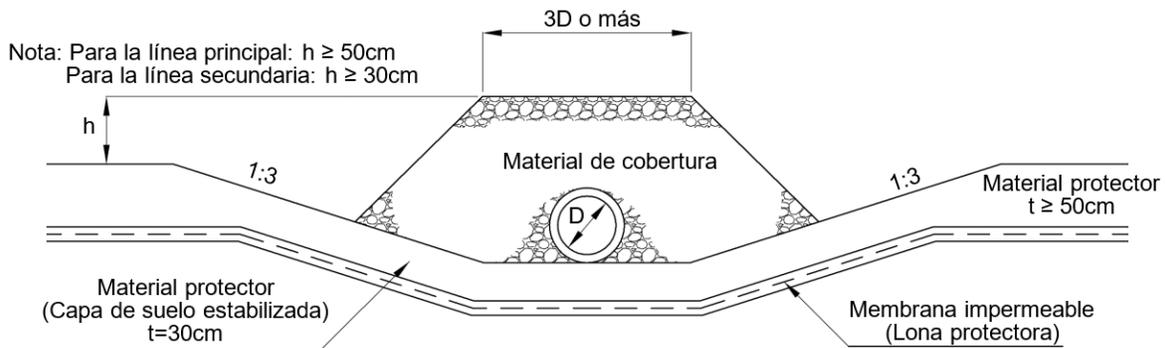
- Tubos perforados de concreto
- Tubos perforados de plástico
- Tubos perforados de plástico reforzado
- Tubos perforados de polietileno de alta densidad (HDPE), conocido como polietileno duro.
- Tubos perforados de PVC (policloruro de vinilo, siglas en inglés)

El material de la tubería de recolección y drenaje de lixiviados debe seleccionarse de forma que tenga la suficiente resistencia estructural para soportar la presión que ejerce la masa de residuos a distintas profundidades y la resistencia química contra la corrosión de los lixiviados.

El diámetro de la tubería viene determinado por la cantidad de lixiviados, las líneas troncales deben tener 400 mm o más y las líneas secundarias deben tener 200 mm o más.

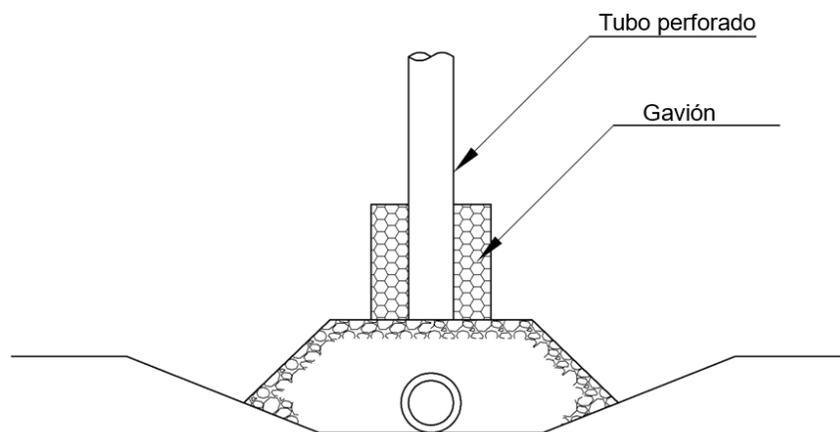
Los tubos de recolección y drenaje de lixiviados deben estar rodeados de material filtrante para evitar la obstrucción de los tubos perforados y garantizar su funcionamiento. Como material filtrante se pueden utilizar piedras bolas, grava, residuos de construcción, etc. El tamaño del material filtrante es generalmente de 50 mm a 150 mm de diámetro.

También puede utilizarse una capa geosintética drenante, formada por una geored y geotextil. La geored fabricada en general de HDPE, forma una estructura tridimensional de drenajes que reemplaza la capa de arena o grava. Esta geored está cubierta con la tela geotextil para evitar que partículas obstruyan el núcleo del drenaje¹².



Fuente: Guías para la planificación, diseño y gestión de sitios de disposición final, Asociación de Gestión de Residuos del Japón, 2010

Figura 30: Ejemplo estructural de una tubería inferior



Fuente: Guías para la planificación, diseño y gestión de sitios de disposición final, Asociación de Gestión de Residuos del Japón, 2010

Figura 31: Ejemplo estructural de una tubería vertical

12. Manual de Protocolo de Construcción Nuevos Rellenos Sanitarios con Revestimientos Compuestos. CCAD, 2010.

Si no hay afluencia de agua de manantial o subterránea en el relleno, la fuente de lixiviados es el agua retenida en los residuos y las lluvias, pero como estas suelen tener el mayor impacto, sólo se considerarán los lixiviados procedentes de las lluvias.

El flujo previsto que debe considerarse para las instalaciones de recolección y drenaje de lixiviados debe ser el mismo que el de las instalaciones de recolección y drenaje de aguas pluviales, y el flujo de diseño debe establecerse de forma que se corresponda con la escorrentía de las precipitaciones a corto plazo.

(1) Determinación de la sección transversal

Además de recolectar y drenar los lixiviados, las tuberías de recolección y drenaje de lixiviados también funcionan como tuberías de suministro y descarga de aire y gas, por lo que el diámetro de la tubería debe ser lo suficientemente grande teniendo en cuenta estas funciones. En el caso de las tuberías perforadas, la parte superior de la sección transversal de la tubería debe considerarse como la sección transversal de distribución de aire y gas, y la sección transversal de la tubería debe determinarse de forma que el flujo objetivo previsto sea de 120 grados (1/3) de la pared de la tubería. Como se mencionó anteriormente, el diámetro de la tubería debe ser de 400 mm o más para la línea troncal y de 200 mm o más para la línea secundaria. Los tubos de polietileno duro suelen utilizarse como material para las líneas troncales y los ramales.

El flujo previsto de lixiviados puede calcularse utilizando la misma ecuación racional¹⁰, solo que, para el caso de las aguas pluviales explicado anteriormente, el área de captación corresponde al área completa del SDF, y para el caso de los lixiviados, corresponderá solo el área específica de la celda:

$$Q = 1/360 \times C' \times I \times A$$

Donde,

Q = Volumen de aguas pluviales (m³/seg)

C = Coeficiente de flujo (Seleccione los coeficientes apropiados de las Tabla 5 y Tabla 6 en la Sección 5.4.6 en función de la topografía del área de captación de la celda).

C' = Coeficiente de lixiviación (C' = 1-C)

I = Intensidad de la lluvia (mm/h) (El intervalo recomendado de recurrencia de tormentas es igual a la vida útil del SDF).

A = Área de captación (Área específica de la celda en ha)

Dado que se considera que el lixiviado es la cantidad de agua que se infiltra en la celda a partir de la lluvia que cae sobre la misma, el coeficiente de lixiviado C' se expresa mediante la ecuación C'=1-C usando el coeficiente de escorrentía C.

Las tuberías perforadas deberán prepararse a tres bolillos con ayuda de una herramienta de perforación (taladro) según se ilustra en la siguiente Figura 32; se iniciarán a 0.10m a partir del extremo del tubo y tendrán un diámetro entre de (5) milímetros y ocho (8) milímetros; estarán espaciadas longitudinalmente a 0.10 metros centro a centro.



Fuente: Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales, Robén Eva, Loja, Ecuador, 2002. Gobierno Autónomo Municipal de Tiquipaya.

Figura 32: Tubería para drenaje de lixiviados en la celda

Como se mencionó anteriormente, en la tubería perforada el agua tiene que fluir a 120 grados (1/3) de la pared, por lo que el flujo máximo debe ser descargado en esta situación. La velocidad media del flujo V debe estar entre 0,8 y 3,0 m/s para descargar el lixiviado lo más rápidamente posible y evitar daños en las tuberías de recolección y drenaje.

5.4.7.2 Diseño del sistema de tratamiento de lixiviados

El objetivo del sistema de tratamiento de lixiviados es evitar la contaminación de los cuerpos de agua a los que estos serían eventualmente vertidos. Por su parte, su función es disminuir la concentración de los elementos y sustancias contaminantes presentes en los lixiviados recolectados en el relleno. Deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- Selección del proceso de tratamiento de lixiviados adecuado: Se seleccionará un proceso de tratamiento basado en la calidad del agua de los lixiviados unido con la calidad del agua de vertido, la cual está determinada por las leyes/ordenanzas y las condiciones de utilización del agua.

- Medidas contra las fluctuaciones de la calidad del agua: La densidad de los lixiviados es mayor, en general, en la fase inicial del vertido, pero se reduce con el paso del tiempo. Al diseñar la instalación de tratamiento de lixiviados, hay que seleccionar el método de tratamiento del agua tomando la calidad representativa del agua en una fase inicial del relleno.
- Medidas contra las fluctuaciones del volumen: Aunque el volumen de lixiviados fluctúa principalmente debido a las precipitaciones, la capacidad de las instalaciones de tratamiento tiene un límite. Por este motivo, la instalación de recolección de lixiviados es indispensable para que la instalación de tratamiento de lixiviados funcione de forma estable durante todo el año. Sin embargo, en las regiones con altas precipitaciones, la capacidad de la instalación de recolección de lixiviados y de la instalación de tratamiento tienden a ser excesivas y dificulta la eficacia económica y la viabilidad del plan del sitio de disposición final. Por lo tanto, es conveniente examinar las posibilidades de reducir el volumen de lixiviados, en la medida de lo posible, mediante la eliminación eficaz de las aguas pluviales.

(1) Tipos de tratamiento

Existen diferentes métodos para el tratamiento de los lixiviados, según el tipo de relleno. En la Tabla 8, se presenta un resumen del tipo de tratamiento aplicable según el nivel de tratamiento requerido, el cual estará relacionado con la normativa referente a la calidad del agua y los parámetros mínimos para su descarga en un medio receptor. A medida que se avanza en el nivel de tratamiento, los costos van aumentando. Así los tratamientos primarios son más baratos que los secundarios (biológicos) y estos a su vez más económicos que los terciarios.

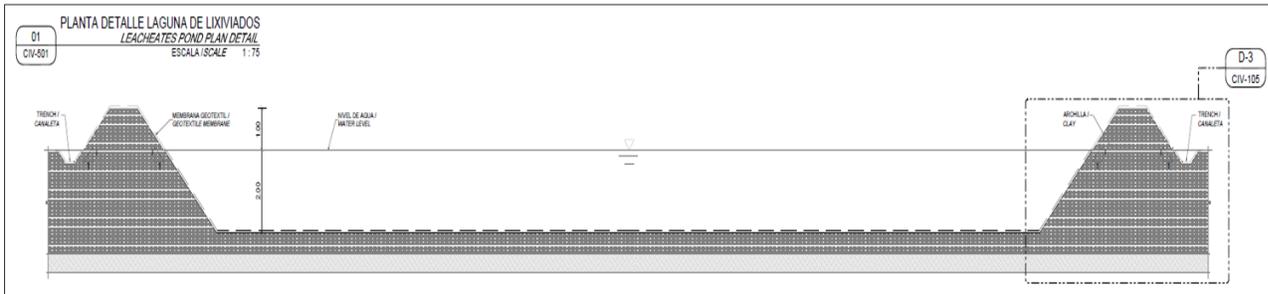
Tabla 8: Tipos de tratamiento de lixiviados

Nivel de tratamiento	Tratamiento
Primario	Recirculación Laguna de Estabilización
Secundario (Biológico)	Anaeróbicos Aeróbicos
Terciario	Fisicoquímicos Membranas

Fuente: Organizado por el Equipo de expertos de JICA (MMAyA/VAPSB/DGGIRS/Guía para el Diseño Construcción, Operación, Mantenimiento y Cierre de Rellenos Sanitarios/2012. Bolivia)

Una de las formas más usuales de tratamiento del lixiviado es mediante la recirculación al interior de la masa de residuos, utilizando 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 lixiviado pierde gradualmente su toxicidad (la carga orgánica fundamentalmente) por aireación y acción biológica de los microorganismos presentes en la masa de residuos.

El tamaño de la laguna debe proveer capacidad suficiente para almacenar una gran cantidad de lixiviado, a fin de evitar que la bomba de recirculación se ponga en funcionamiento a intervalos muy cortos. Por otro lado, 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.



Fuente: Equipo de Expertos de JICA, Diseño Vertedero Moca, RD.-
Figura 33: Sección transversal de una laguna de lixiviados

Los procesos biológicos se realizan mediante microorganismos, los cuales actúan sobre la materia orgánica e inorgánica presente en el lixiviado, descomponiéndola en gases y materia flotante, que luego se separa por 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).

Los tratamientos aeróbicos se utilizan cuando se requiere obtener una baja concentración de DBO_5 en los efluentes. Existe una gran variedad de sistemas, desde las tradicionales lagunas aireadas hasta sistemas complejos que integran reactores biológicos con procesos de ultrafiltración con membranas.

La laguna de estabilización es una de las formas de tratamiento más común. El efluente del lixiviado es descargado después de pasar por una rejilla manual o criba mecánica. La remoción de la materia orgánica (expresada en DBO_5) se realiza a través de procesos biológicos aerobios y anaerobios. Según predomine uno u otro proceso, se denominan lagunas aerobias (de maduración o pulimento), anaerobias o facultativas (ambos procesos están presentes).

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 mínimo¹³. 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 días¹⁴.



13. MMAyA/VAPSB/DGGIRS/Guía para el Diseño Construcción, Operación, Mantenimiento y Cierre de Rellenos Sanitarios/2012. Bolivia. Página 92
 14. Idem.



Foto 5: Laguna de lixiviados en el Relleno Sanitario de ASINORLU, Santa Rosa de Lima, El Salvador

Los tratamientos fisicoquímicos se utilizan para eliminar sólidos en suspensión, partículas coloidales, metales pesados y otros compuestos tóxicos. Se basan en procesos de coagulación – floculación y la producción de compuestos insolubles de metales pesados. En los procesos coagulación - floculación y flotación se añaden sustancias químicas (coagulantes), lo que permite la formación de coágulos/flóculos, los cuales quedan suspendidos y luego son removidos. Otros procesos terciarios más complejos pueden remover tanto partículas suspendidas como disueltas.

La tecnología del tratamiento de lixiviados utilizando membranas comprende la microfiltración, la ultrafiltración y la osmosis inversa. Entre los tratamientos más empleados son: Bioreactores con membrana y la Osmosis Inversa. Son tratamientos sumamente costosos que difícilmente puedan aplicarse en la actualidad en nuestro país, además que se cuenta con un clima favorable que permite apostar a la estabilización de los residuos y sus lixiviados mediante el uso efectivo de la capacidad de depuración de la naturaleza.

En la República Dominicana, existen la “Norma ambiental de calidad de aguas superficiales y costeras” y la “Norma Ambiental sobre control de descargas a aguas superficiales, alcantarillado sanitario y aguas costeras”. La calidad de un lixiviado tratado, sea en instalaciones propias del SDF o en plantas públicas de tratamiento de aguas residuales, con fines de ser incorporado a cuerpos de agua, debe cumplir con estas normas.

5.4.7.3 Cálculo de la Laguna de Lixiviados

Las lagunas de lixiviados se instalan para evitar que los lixiviados generados por los residuos en el vertedero fluyan hacia fuera del SDF y contaminen las aguas subterráneas y el medio acuático circundantes. La capacidad de la laguna de lixiviados se calcula mediante el siguiente método basado en la fórmula racional.

$Q=1/1000 C' I A D$ (Fórmula racional)

Donde:

Q = Volumen de lixiviado ($m^3/día$)

C' = Coeficiente de Lixiviación= 1-C (Coeficiente de escurrimiento, ver tablas 5 y 6 para recolección de aguas pluviales)

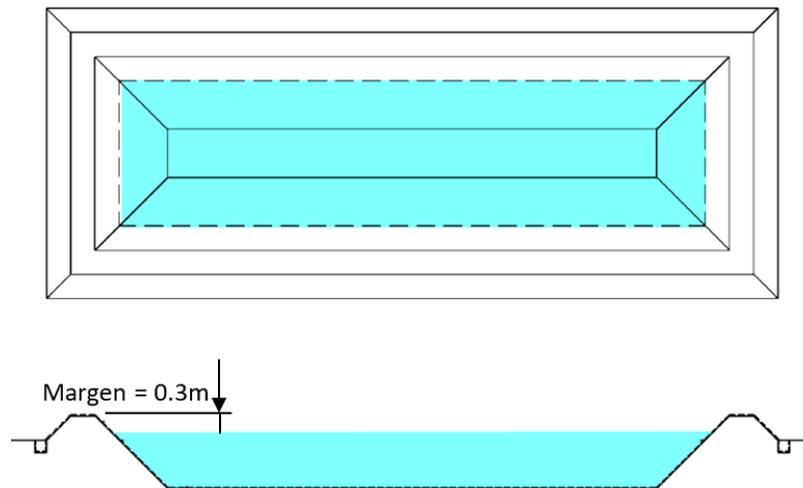
I = Precipitación diaria ($mm/día$)

A = Área de captación de la celda (m^2)

D = Días de almacenamiento de lixiviado (días)

El valor D se determina teniendo en cuenta el número de días consecutivos de precipitaciones registradas en el pasado. Si el número de días consecutivos de lluvia supera los 7 días, se debe usar una bomba de circulación en paralelo con la otra bomba para garantizar que no se exceda la capacidad de almacenamiento de lixiviados.

Las dimensiones de la laguna de lixiviados deben determinarse agregando un margen al volumen de lixiviado calculado. Se recomienda que el margen sea de unos 0.3 m de altura desde el nivel más alto del agua.



Fuente: Equipo de expertos de JICA

Figura 34: Imagen de una laguna de lixiviados

5.4.8 Diseño del revestimiento e impermeabilización

Las instalaciones de revestimiento e impermeabilización se implementan para evitar la contaminación de las masas de agua superficiales y subterráneas por los posibles lixiviados vertidos desde un SDF. También evita el aumento de la cantidad de lixiviados debido a la entrada de aguas subterráneas de los alrededores del SDF.

Es importante planificar y diseñar las instalaciones de revestimiento de acuerdo con la topografía y las características del subsuelo. La política general de diseño es evitar que los lixiviados procedentes de un SDF emigren al exterior, teniendo en cuenta las características de la forma del terreno, la permeabilidad del suelo y las características de las aguas subterráneas.

Los geosintéticos son ampliamente utilizados en el diseño de sistemas de impermeabilización tanto de la base como la cobertura final en instalaciones de rellenos sanitarios. Para mayor protección, se recomienda utilizar los siguientes geosintéticos:

- Geomembranas (con función de aislamiento), son láminas poliméricas relativamente impermeables que pueden ser usadas como barreras de líquidos, gases y/o vapores.
- Geotextiles (con función de refuerzo, separación, filtración, drenaje). Pueden ser usados con fines de filtración o como un colchón para proteger geomembranas contra el punzonado.

Para rellenos sanitarios nuevos en la República Dominicana, el MMARN ha determinado colocar una Geomembrana de Polietileno de Alta Densidad con espesor de 1.5 mm que garantice evitar roturas. Dado que las geomembranas frecuentemente reciben daños con el paso de maquinaria compactadora y camiones, se deben colocar geotextiles como material de amortiguación y una capa protectora de suelo encima del geotextil. Además, el suelo natural debajo de la geomembrana debe compactarse para evitar dañar la geomembrana. Cabe señalar que el éxito del uso de cualquier revestimiento dependerá de su correcta colocación.

El esquema de colocación del revestimiento descrito se presenta en la siguiente Figura 35:



Fuente: Equipo de expertos de JICA

Figura 35: Esquema del Sistema de impermeabilización requerido en cada celda

Según las pruebas de laboratorio adecuadas, el revestimiento de la celda deberá cumplir con las siguientes especificaciones:

- Suelo compactado: material con 90% a la prueba de Proctor modificado; material preferiblemente arcilloso;
- Geomembrana: geosintético de polietileno de alta densidad con espesor de 1.5 mm.
- Geotextil: geosintético de material apto para operaciones con residuos sólidos.
- Suelo de protección: Capa protectora de 50cm de material compactado, que servirá de protección para la geomembrana y como capa de rodadura para la operación de los equipos.

5.4.9 Diseño de las instalaciones para ventilación de gases

Un relleno sanitario se comporta como un digestor anaerobio. Como se ya se ha explicado en el capítulo 2.1.4, debido a la descomposición o putrefacción natural de los residuos sólidos, no solo se producen líquidos sino también gases y otros compuestos.

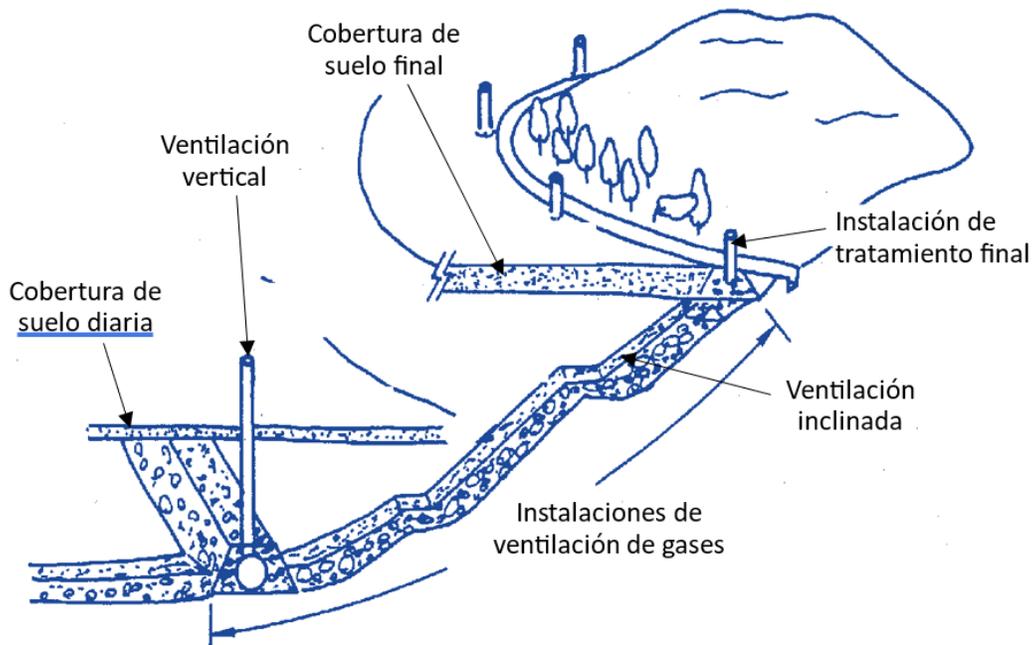
El propósito del sistema de ventilación de gases es evitar la acumulación de estos en el relleno para prevenir explosiones e incendios y sus funciones principales son las siguientes:

- Función de liberación de los gases: Libera rápidamente a la atmósfera, los gases generados por los residuos depositados en el relleno.
- Función de suministro de aire (estabilización): Suministra oxígeno al relleno para crear una condición semiaeróbica y promover la descomposición de los residuos (caso de los rellenos semiaeróbicos).
- Función de reducción de lixiviados y estabilización: Reduce el agua acumulada en la masa de residuos del relleno mediante la recolección y el transporte de los lixiviados favoreciendo su estabilización.

La emisión de gases depende principalmente de la edad de la masa de residuos y del tipo de residuos depositados. Los parámetros que condicionan de forma prioritaria la generación de biogás son 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 de recirculación de lixiviados. El biogás de un relleno sanitario generalmente está compuesto entre un 30% a 60% en volumen por metano, y entre un 20% a 40% en volumen por dióxido de carbono. Otros gases solamente están presentes en pequeñas cantidades. El nitrógeno y el oxígeno, se presentan en porcentajes elevados en las fases iniciales de producción de biogás, cuando la producción de metano y dióxido de carbono se encuentra en niveles bajos, luego, al aumentar los porcentajes de metano y dióxido de carbono, tanto el oxígeno como el nitrógeno tienden a valores cercanos a cero. Finalmente, cuando los procesos de degradación de la materia orgánica provocan el descenso de la generación de metano y dióxido de carbono, nuevamente aumenta la presencia de nitrógeno y oxígeno. Hay que controlar los gases durante todo el tiempo que dure su generación para garantizar la seguridad y evitar concentraciones de gas metano en la celda que podrían producir explosiones.

Los sistemas típicos para controlar el gas incluyen: pozos de extracción y combustión del gas de forma individual o pozos de captación con tuberías de recogida y transmisión a instalaciones de antorchas para la quema de gases o en rellenos muy grandes para la recuperación energética.

La siguiente figura muestra un diagrama conceptual de una instalación de venteo de gas.



Fuente: Guías para la planificación, diseño y gestión de sitios de disposición final, Asociación de Gestión de Residuos del Japón, 2010

Figura 36: Dibujo Conceptual instalaciones para ventilación de gases

El nivel de rigurosidad del proceso de instalación del sistema de ventilación de los gases dependerá de las condiciones y el tamaño del SDF en cuestión. Las instalaciones mínimas consisten en tubos perforados instalados con ayuda de piedras y otras herramientas sencillas para la liberación de estos al aire.



Fuente: Manual para la rehabilitación, clausura y saneamiento de tiraderos a cielo abierto en el Estado de México, Secretaría de Ecología, México.

Figura 37: Ejemplo de una instalación sencilla para ventilación de gases

A partir de experiencias de otros países, las instalaciones de ventilación de gases suelen construirse con una combinación de gaviones y tubos de PVC o HDPE perforados. El diámetro o ancho del gavión usualmente ronda los 300-500 mm. Las tuberías verticales se amplían en altura a medida que avanza el período de vertido.

Los tubos perforados suelen tener un diámetro de 150 mm o más. Sin embargo, para el método de relleno sanitario semiaeróbico (método de Fukuoka), el diámetro de la tubería perforada debe ser de 200 mm o más. Además, las tuberías de ventilación de gases verticales deben colocarse a intervalos de 40-50 m.



Fuente: Equipo de expertos de JICA

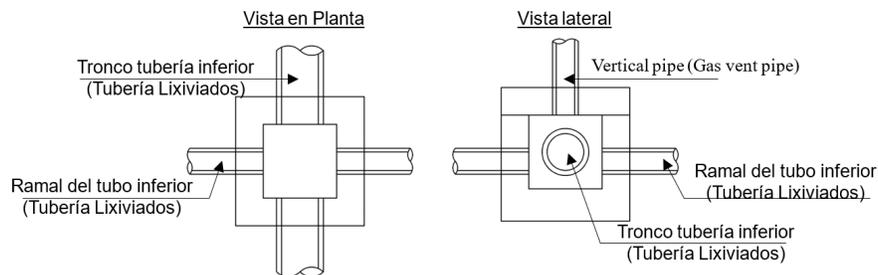
Foto 6: Instalación tubería para ventilación de gases Relleno Sanitario Moyobamba, Perú.

5.4.9.1 Consideraciones para la instalación de tuberías para venteo de gases

Las funciones de las tuberías de ventilación de gas y las tuberías de lixiviados en los rellenos sanitarios semiaeróbicos son las siguientes:

- Liberar a la atmósfera los gases generados por los residuos a la mayor brevedad.
- Verter rápidamente los lixiviados.
- Suministrar aire al interior de la masa de residuos

Por lo tanto, es necesario conectar físicamente las tuberías de venteo de gases y las tuberías de lixiviados entre sí, y para la conexión se utilizan anclajes de conexión de hormigón o piezas adecuadas. Esta conexión es clave para el correcto funcionamiento del sistema.



Fuente: Equipo de expertos de JICA

Figura 38: Ejemplo de la estructura de conexión

5.4.10 Consideraciones para el material de cobertura

La cobertura se define como la acción de revestir los residuos sólidos con material adecuado, después de que hayan sido nivelados y compactados, en el área ya conformada. En una cobertura de suelo existen tres tipos de cobertura: diaria, intermedia y final. La cobertura diaria y la cobertura intermedia se realizan durante la operación del relleno, mientras que la cobertura final se realiza en el momento de su cierre o clausura. La cobertura diaria debe colocarse, como su nombre lo indica, de forma continua y dentro de las 24 horas siguientes al depósito de los residuos. Si la cobertura diaria del suelo no es factible, debe realizarse al menos tres veces por semana².

Los objetivos de la cobertura son:

- Proporcionar protección contra incendios
- Promoción de la escorrentía de agua de lluvia
- Reducir la infiltración de agua de lluvia
- Mejorar la generación de biogás (creando condiciones anaeróbicas más rápido)
- Reducir los olores
- Proporcionar control vectorial (sin residuos expuestos no hay comida para animales)
- Controlar el acceso a los recicladores (sin residuos expuestos no hay material disponible para extraer en el frente de trabajo)

Los materiales recomendados para servir como cobertura diaria son, dependiendo de su disponibilidad en la zona: caliche, arcilla, granzote fino, compost, entre otros. La disponibilidad del material de cobertura en el sitio donde se encuentra el SDF es un aspecto clave en la selección del sitio para reducir los costos durante la operación.

En general, el material de cobertura se clasifica en tipo granulado y tipo arcilloso. La permeabilidad del material de cobertura es diferente según los distintos tipos de suelo utilizados.

En la mayoría de los casos, se utiliza tierra, ya que es fácil de conseguir. Se evitará el tipo de material extremadamente ácido o alcalino, o que contenga sustancias nocivas o cualquier cosa que deteriore la calidad del lixiviado. También se evitarán los materiales que contengan sustancias nocivas para las plantas.

En la medida de lo posible, para la cobertura diaria se utilizarán tipos de arena permeables y porosas para garantizar una fácil extensión y compactación de los residuos sólidos, estabilizar las capas de residuos y no obstaculizar su proceso de descomposición. El espesor de la capa debe ser lo más fina posible para evitar la presión sobre la capacidad del relleno debido a la tierra de cobertura diaria.

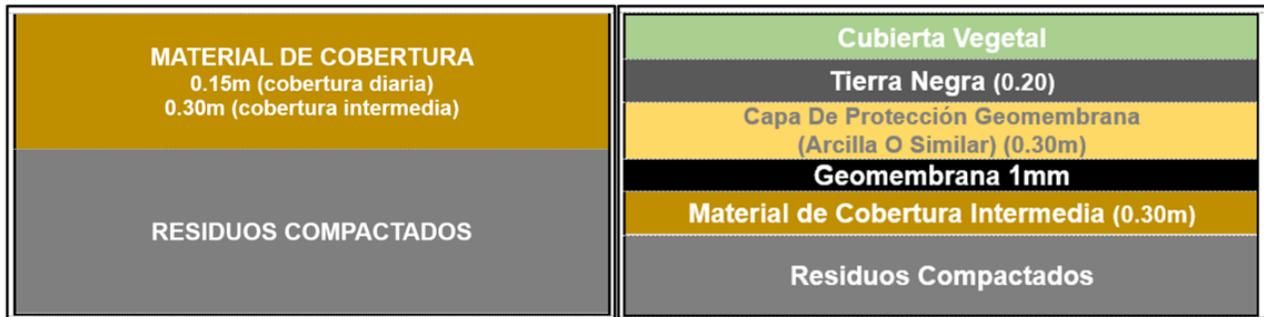
En cuanto a la cobertura de suelo intermedio el arcilloso es adecuado para evitar que los gases se dispersen o que el agua de lluvia se filtre en las capas de residuos. Sin embargo, si la zona se va a utilizar como base para carreteras, se recomienda utilizar piedras trituradas como material de cobertura.

El material de cobertura final deberá ser resistente a la corrosión por el agua de lluvia, de baja permeabilidad y adecuado para las plantas.

El espesor del material de cobertura final se determina en función de la composición de los residuos sólidos, la conservación del medio ambiente, etc.

A partir de las experiencias de otros países, se adoptarán los siguientes espesores:

- Material de cobertura diaria: 0.15 m o más (Espesor después de la compactación)
- Material de cobertura intermedia: 0.30 m o más (Espesor después de la compactación)
- Material de cobertura final: capa compuesta por varios materiales naturales y una geomembrana sintética (ver Figura 39).



Fuente: Equipo de expertos de JICA

Figura 39: Esquema de la cobertura diaria e intermedia (Izquierda) y cobertura final (derecha)

En el Manual de Operación de SDF se detallan las especificaciones para los tres tipos de cobertura.

5.5 Diseño de las instalaciones complementarias

Las instalaciones necesarias para la adecuada administración del sitio de disposición final deben ser adecuadamente concebidas y provistas, incluyendo:

- Edificio de administración;
- Instalaciones de monitoreo ambiental;
- Caminos de acceso y vías de mantenimiento;
- Lavadero de vehículos
- Otras instalaciones según sea necesario.

5.5.1 Edificio de administración

Para mantener el medio ambiente, garantizar la seguridad y operar el SDF de forma adecuada y económicamente factible, es necesario llevar a cabo sistemáticamente una serie de operaciones como la inspección y el pesaje de los residuos que se van a verter, la confirmación de la coherencia entre el plan del SDF y el estado del relleno, asegurar el material de cobertura del suelo, la instalación de diques compartimentados, la operación y el mantenimiento de las instalaciones de tratamiento de lixiviados y el monitoreo de todo el SDF.

El edificio de administración debe estar preparado para la gestión integral de estas instalaciones y operaciones, y consta de la oficina de administración, las salas de pruebas y análisis y, si es necesario, las salas de espera de los trabajadores, las duchas, los vestuarios, las salas de suministro de agua caliente, la cafetería, los baños y las salas de conferencia. También se debe considerar la instalación de equipos de ventilación, equipos de comunicación, equipos telefónicos y equipos aire acondicionado en las salas necesarias. El tamaño y el sistema de gestión del sitio de disposición final debe considerarse en su totalidad a la hora de decidir qué instalaciones y salas se necesitan, y también debe tenerse en cuenta el entorno de trabajo deseado para el personal del sitio.



Fuente: Equipo de expertos de JICA

Foto 7: Edificio administrativo relleno sanitario Tarapoto, Perú

5.5.1.1 Planificación del edificio administrativo

Hay casos en los que la báscula puente se instala cerca del edificio de control de la carga, o en los que se construye un edificio independiente para el pesaje, pero, en cualquier caso, el control de la carga no consiste sólo en pesar la carga, sino también en inspeccionar si los residuos cumplen los criterios de aceptación. Por lo tanto, debe tenerse suficientemente en cuenta la ubicación del edificio de control a la hora de planificar un SDF.

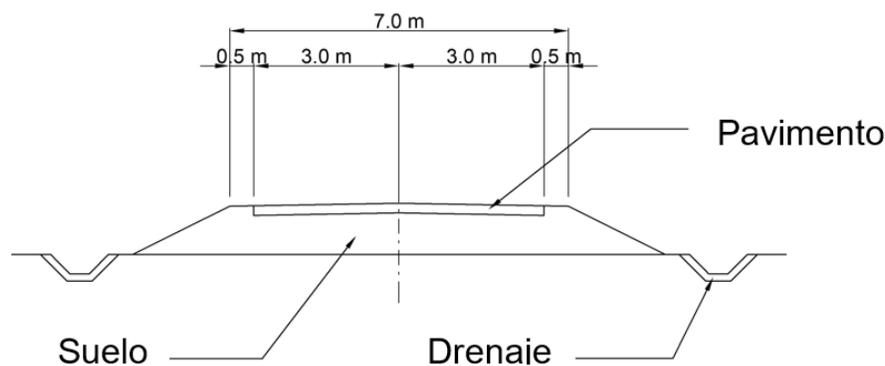
En consideración al entorno que rodea al sitio de disposición final, se deben implementar instalaciones de lavado de vehículos en la ruta de salida para evitar que los vehículos que transportan residuos al SDF dejen la carrocería y los neumáticos cubiertos de tierra y a su vez, dejen las vías públicas cubiertas con residuos- Además, se deben implementar garajes, depósitos de aceite, almacenes, equipos de mantenimiento e inspección de maquinaria, equipos de iluminación de los locales, equipos de comunicación, monitores, etc.

5.5.2 Caminos de acceso y vías de mantenimiento

Los caminos de acceso deben tener lo necesario para la gestión diaria, el mantenimiento, la inspección, la prevención de incendios y la gestión de la seguridad de varias instalaciones en el sitio de disposición final, así como para la carga y descarga de materiales. En particular, es recomendable implementar vías para los siguientes fines en la medida de lo posible:

- Vías que puedan utilizarse para rodear el perímetro del sitio de disposición final para patrullar e inspeccionar toda la zona;
- Vías que permitan la carga y descarga de maquinaria y materiales hacia y desde las instalaciones de tratamiento de lixiviados;
- Vías para la extinción de incendios en zonas donde se espera que estos ocurran.
- Vías para trabajos como el exterminio de plagas y animales y la pulverización de productos químicos cuando son necesarias medidas de control de olores.

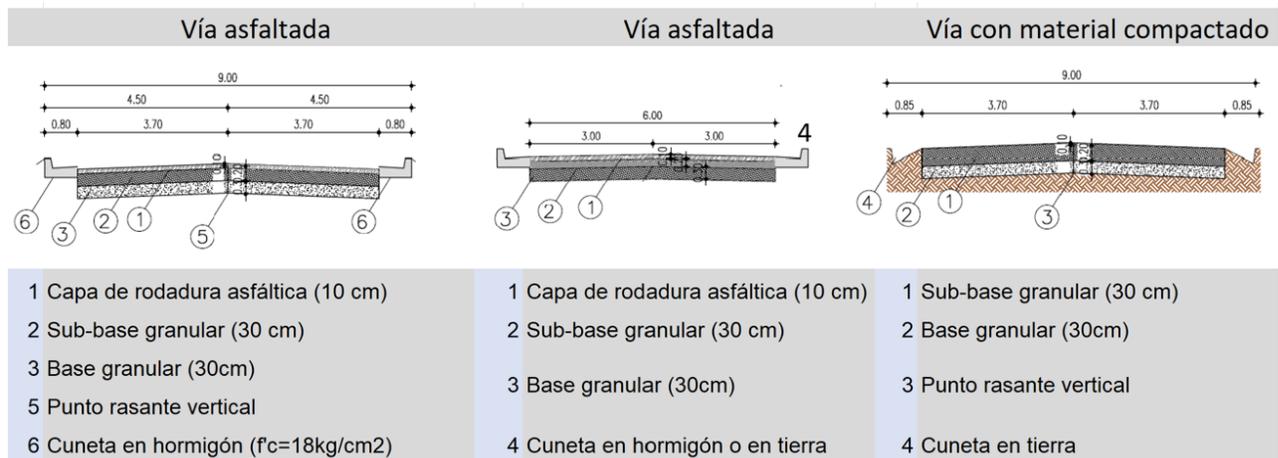
Aunque algunas vías tienen poco tráfico, es necesario tomar medidas de seguridad. En particular, deben adoptarse medidas de seguridad como la instalación de barandillas y pasamanos en las vías elevadas, y la instalación de espejos curvos cuando la visibilidad sea escasa.



Fuente: Equipo de expertos de JICA

Figura 40: Esquema de una sección transversal un camino de acceso

Para la estructura de las vías, es aconsejable remitirse a las normas viales. En la figura siguiente se muestra una sección transversal típica de una carretera de mantenimiento:



Fuente: Diseño de un plan de Manejo Integral para los residuos sólidos en la MAGSD, Nippon Koei-Kokusai Kogyo, BID, 2013

Figura 41: Secciones típicas para los caminos de acceso y vías de mantenimiento. -

5.5.3 Diseño de instalaciones de monitoreo ambiental

Los sistemas de monitoreo se utilizan para identificar los posibles impactos del SDF en el medio ambiente. Por ello, es muy importante proveer al SDF de la infraestructura de monitoreo necesaria para su seguimiento durante la fase de operación.

El monitoreo ambiental conlleva el seguimiento y evaluación periódicos de la calidad de los elementos naturales principalmente: aire, agua y suelo, a través de registros continuos, muestreos y análisis de laboratorio, para determinar el estado del medio ambiente y las causas que lo condicionan. El monitoreo ambiental de un relleno sanitario, debe ser un instrumento de vigilancia de las condiciones que pueden afectar la salud pública o el ambiente, ayudando a prevenir los impactos ambientales negativos a lo largo de la vida útil del relleno sanitario.

Es necesario realizar un monitoreo periódico de los residuos del SDF, los lixiviados, las aguas subterráneas, las aguas superficiales, los gases residuales y los olores para lograr una gestión y un control adecuados del sitio de disposición final.

Como el monitoreo corresponde en sí a la fase de operación y está descrito en el manual de Operación de SDF, en este manual nos enfocaremos en la construcción de los pozos de monitoreo para aguas subterráneas. Uno de los peligros potenciales que pueden derivarse de un SDF es la fuga y la migración de lixiviados a las masas de agua subterránea.

En cada SDF es necesario controlar la contaminación del agua lixiviada y el impacto en la calidad de las aguas subterráneas. Se recomienda realizar el análisis en dos lugares diferentes, perforando con un agujero hasta el nivel de la primera capa freática.

El objetivo del monitoreo de las aguas subterráneas es:

- Comprobar que el sistema de revestimiento y/o la capa de impermeabilización del relleno funcionan correctamente (no hay fugas de lixiviados).
- Verificar el grado de propagación de las sustancias nocivas contenidas en el flujo de lixiviados hacia las aguas subterráneas.
- Comprobar el grado de contaminación del entorno en caso de fallo del sistema de revestimiento y/o de la capa de impermeabilización.

Hay algunos casos en los que el análisis de las aguas subterráneas no es necesario:

- Sitios donde nivel freático es muy profundo (más de 40 m por debajo de la capa inferior del relleno).
- Sitios con una barrera geológica impermeable.
- Regiones áridas con menos de 300 mm de precipitación anual.

Se recomienda analizar a fondo las aguas subterráneas en las siguientes situaciones:

- Rellenos con un nivel freático muy alto (3 m o menos por debajo de la capa inferior del relleno, aunque esta condición debe evitarse según se indica en la sección 0 sobre criterios de selección del sitio).
- Si existe una captación de agua (para riego o suministro de agua potable) en la misma cuenca del SDF y en el nivel más bajo del mismo.
- SDF grandes
- SDF cercanos a comunidades en los que el agua se suministra mediante pozos (aquí se pueden tomar pruebas de los pozos más cercanos para abaratar los costos).
- SDF medianos y grandes con una capa inferior impermeable mal construida.
- SDF contruidos en suelos arenosos u otros suelos altamente permeables.

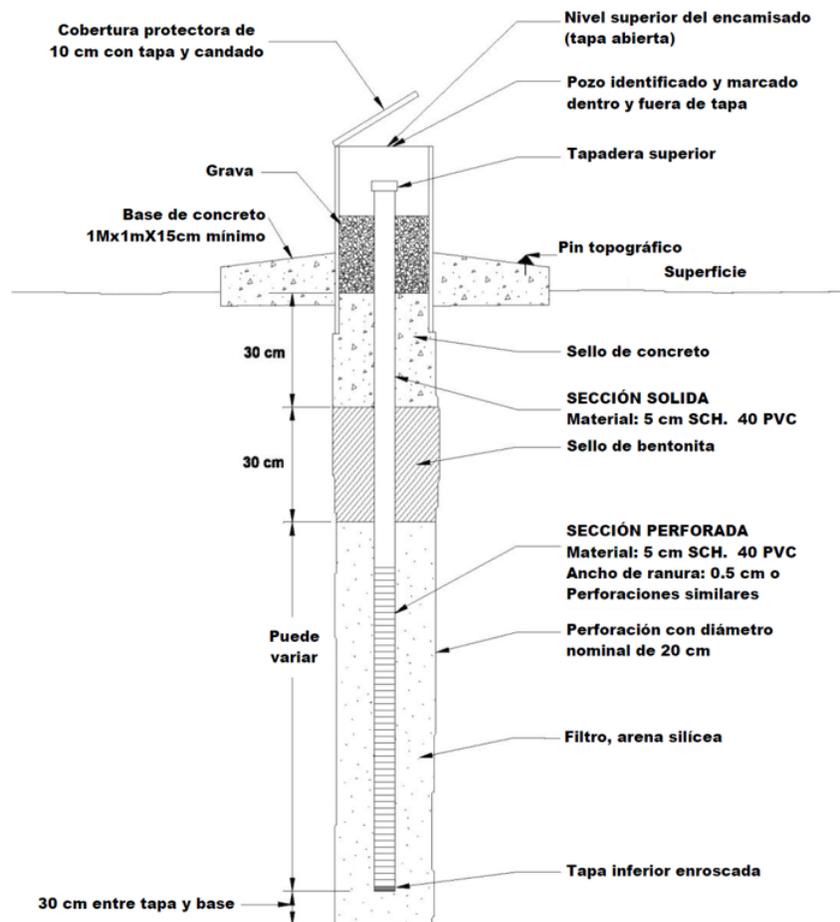
El propósito de un pozo de monitoreo de aguas subterráneas en un relleno es proveer muestras de agua que representen las condiciones de las aguas subterráneas in-situ. Los análisis de las muestras de laboratorio se utilizan para determinar si el relleno está generando un impacto en las aguas subterráneas.

Después de instalar el sistema de monitoreo de las aguas subterráneas, se recolectan muestras a una frecuencia intencional para determinar la variación natural estacional en la química de las aguas subterráneas. Se analiza en las muestras la presencia de metales y constituyentes orgánicos volátiles.

Se debe instalar un sistema de monitoreo de aguas subterráneas alrededor del perímetro del sitio del relleno con una cantidad suficiente de pozos de monitoreo instalados en ubicaciones y a profundidades apropiadas para presentar muestras representativas de las aguas subterráneas del acuífero. Este sistema de monitoreo de aguas subterráneas se debe diseñar en base a un estudio hidrogeológico detallado de la propiedad en donde se ubica el relleno. Los pozos para el monitoreo de aguas subterráneas se deben colocar a una distancia máxima de 250 metros uno del otro y alrededor del perímetro descendente del sitio en donde se ubica el relleno.

Los pozos de monitoreo generalmente se construyen con tubos de PVC. Los componentes individuales de los tubos se pueden enroscar; no se necesita goma o solventes en el proceso de ensamblaje e instalación. La sección del fondo de las tuberías del pozo se debe filtrar. El filtro del pozo es la tubería PVC ranurada para que ingresen allí las aguas subterráneas. El monitoreo de la longitud del filtro del pozo es variable y depende de las condiciones del sitio. Tres metros es una longitud común para un filtro de pozo de monitoreo de relleno sanitario.

El método de perforación más común y eficiente para un pozo de monitoreo no profundo es la perforación de hueco interior a longitud de pieza perforadora. Este método es adecuado para pozos relativamente superficiales en materiales geológicos relativamente blandos tales como suelos, arcillas o bien materiales no consolidados. La perforación de hueco interior de tubo perforador generalmente no es efectiva en roca dura o en pozos que tienen una profundidad mucho mayor a los 15 metros.



Fuente: Manual de Protocolo de Construcción Nuevos Rellenos Sanitarios con Revestimientos Compuestos. CCAD, 2010.

Figura 42: Detalle de un pozo de monitoreo de aguas subterráneas común o piezómetro.

5.5.4 Instalación para lavado de vehículos

La instalación de lavado de vehículos tiene como función realizar la limpieza de los vehículos de recolección y entrega de residuos y así garantizar la higiene durante estas operaciones. Las provisiones para el lavado de vehículos deben incluirse en el diseño de la instalación si existe adecuado abastecimiento de agua. El lavado de vehículos se refiere a la limpieza general del equipo empleado en el relleno sanitario y al lavado de las ruedas de los vehículos de recolección. Los requisitos para el lavado de vehículos son:

- Fuente de agua confiable,
- Bomba u otros medios para esparcir el agua a presión
- Área de lavado con control de la escorrentía.

El área de lavado debe tener una superficie pavimentada para evitar la formación de lodo y debe tener rebordes o bermas para desviar la escorrentía hacia un canal de recolección.

La instalación de lavado de vehículos debe estar ubicada, de modo que evite que los vehículos vuelvan a ensuciarse cuando salgan del lugar.

Ya que estos vehículos entran en la instalación de lavado de vehículos después de pasar por el relleno, los vehículos y los neumáticos suelen estar cubiertos de tierra y residuos.

Por lo tanto, el agua que usa para el lavado debe ser tratada como lixiviado. El sedimento depositado en la parte inferior de la instalación de lavado de vehículos también debe disponerse en un relleno, ya que puede contener residuos de materiales.

5.5.5 Otras consideraciones

5.5.5.1 Zona de Amortiguamiento

La zona de amortiguamiento de un SDF se refiere a una franja de distanciamiento mínimo que permita minimizar los efectos de la disposición de los residuos en la comunidad circundante. Debe ubicarse alrededor de todo el SDF y se espera que tenga los siguientes efectos;

- Que minimice la visual hacia la zona de operación del SDF;
- Que prevenga la dispersión de residuos;
- Que evite la propagación de malos olores hacia el entorno.

De conformidad con el artículo 107 del Reglamento General de Aplicación de la Ley 225-20, Decreto 320-21, la franja de amortiguamiento perimetral debe tener al menos 15 m de ancho.

5.5.5.2 Instalación y suministro de equipos para la prevención de incendios

Los incendios que ocurren en los rellenos sanitarios, se propagan extremadamente rápido debido a la generación de gas metano y también de otros materiales combustibles. Por lo tanto, para evitar brotes de incendios, se recomienda que los gases generados por las capas de residuos se eliminen utilizando ventilaciones de gas adecuadas y que los residuos se cubran con tierra lo antes posible. Al liberar el gas a la atmósfera, se pueden evitar explosiones e incendios en las capas de residuos. Una vez que ocurre un incendio, será extremadamente difícil extinguirlo.

En el Manual de Operación de SDF se detallan las medidas a considerar y las acciones a seguir ante un incendio.

5.6 Estimación del costo del proyecto

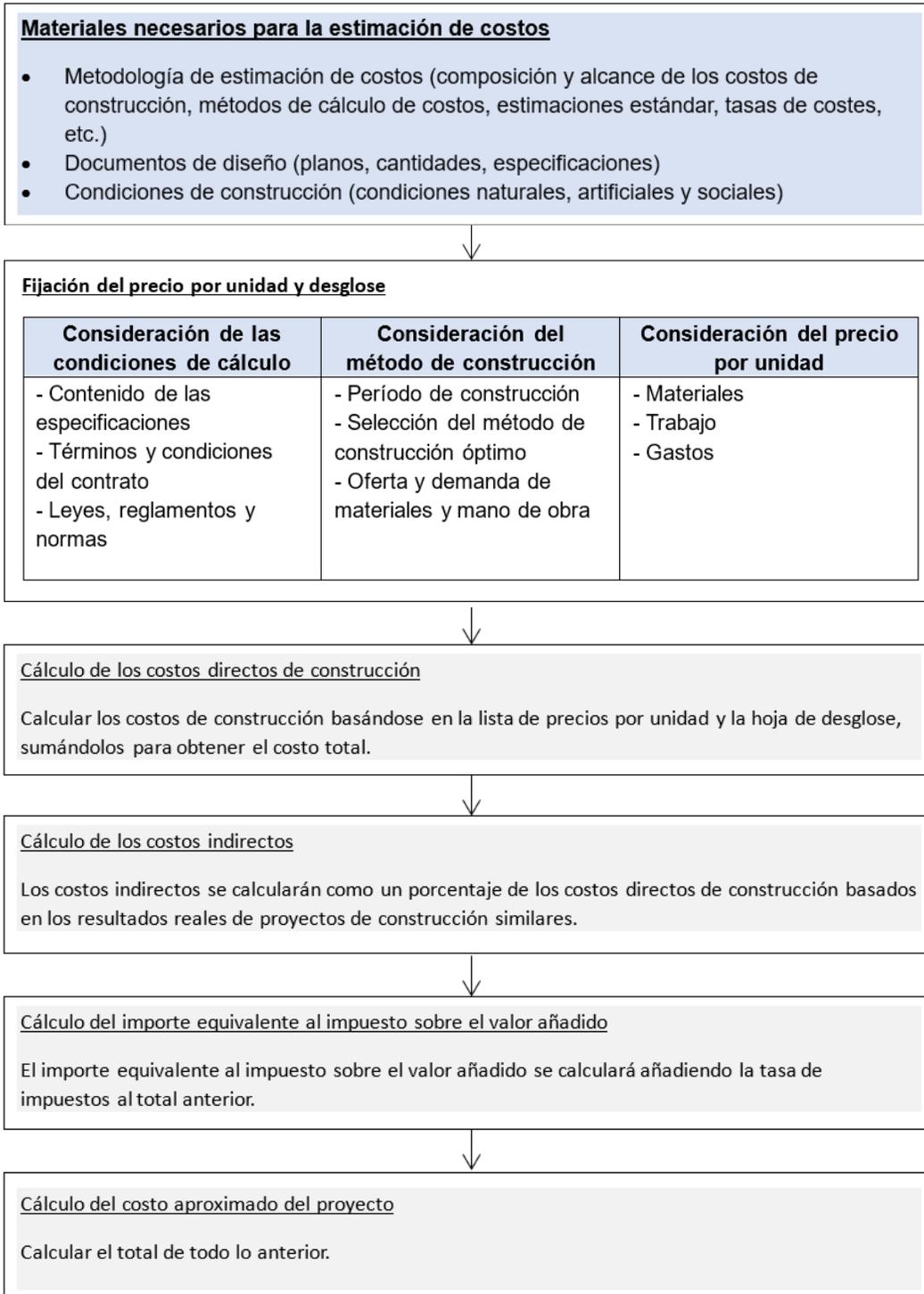
Cuando se trata de un SDF nuevo, la persona a cargo del diseño deberá proveer un presupuesto de construcción y de operación para la infraestructura que haya considerado, ya que los costos operativos juegan un papel importante a la hora de definir el tipo de instalación, método y la tecnología a utilizar en cualquier obra de ingeniería.

La estimación del costo aproximado del proyecto se realiza a partir de los planos del diseño de ejecución, la lista de cantidades y el precio por unidad fijado por cada municipio. El precio por unidad estándar debe ser fijado por cada municipio basándose en los resultados anteriores y en la comparación de los presupuestos de varios contratistas.

En el presupuesto de costos del proyecto se estimarán los siguientes gastos según sea necesario:

- Costos para la construcción de las instalaciones del sitio de disposición final: El costo de construcción de las instalaciones principales del sitio de disposición final, tal como se describe en el Capítulo 5.
- Costo del material de cobertura: Costo del material de cobertura (diaria, intermedia y final). Dado que la cantidad de material de cobertura que se va a utilizar es grande, es necesario calcular cuidadosamente la cantidad y estimar el costo. También hay que tener en cuenta el costo del transporte del material de cobertura desde el lugar de recogida.
- Costos de compra o alquiler de equipos pesados: Estimar los costos según el método de adquisición (compra o alquiler) de los equipos pesados que se utilizarán para la construcción. Para reducir los costos, es aconsejable comparar los precios de compra y de alquiler, en función del periodo de uso, y adoptar el método menos costoso.
- Costo de adquisición del terreno: Si el terreno necesario para la construcción del vertedero final es un terreno privado, se debe estimar el costo que implicará adquirir el terreno.

El procedimiento de estimación de costos se muestra en la siguiente Figura:



Fuente: Elaborado por JET con referencia a "Guías para la planificación, diseño y gestión de sitios de disposición final, Asociación de Gestión de Residuos del Japón, 2010"

Figura 43: Procedimiento de estimación de costos.

En el Manual de Operación de un SDF se presenta un desglose de todos los costos a considerar desde la etapa de planificación, lo que hará posible evaluar la factibilidad financiera del proyecto desde sus inicios.

6. INSTALACIÓN Y CONSTRUCCIÓN

6.1 Adquisición de fondos

De conformidad con el artículo 38 de la Ley General (Ley 225-20), el Fideicomiso podrá realizar aportes a personas físicas y jurídicas que, cumpliendo con los requisitos legales, desarrollen proyectos de rellenos sanitarios. Esto podría incluir los costos de planificación y los gastos de consultoría para la gestión de la construcción de un SDF nuevo. Hay que tener en cuenta que, al no haber ninguna estipulación sobre la proporción de la contribución del Fideicomiso, se supone que el importe de la aprobación se determinará en función de la combinación del presupuesto del Fideicomiso y el nivel de prioridad entre otros proyectos candidatos.

- Las partidas que deben asumir los municipios son las siguientes.
- Costo de adquisición de terrenos: Es conveniente repartir los costos entre todos los municipios que utilizarían los sitios de disposición final nuevos, independientemente de la ubicación de este.
- Parte del costo de construcción (costo total menos la contribución del Fideicomiso): Los costos serán asignados entre los municipios en proporción con el volumen de residuos.
- Costo de administración: A cargo de cada municipio

Se les hace un llamado a los municipios implicados a acordar los detalles de las funciones, las responsabilidades y el reparto de los costos mediante un Memorándum de Acuerdo (MdA) o su equivalente. El MdA debe incluir disposiciones para medidas preventivas contra el incumplimiento (por ejemplo, depósito en una cuenta bancaria conjunta o compartida) o medidas de arbitraje (por ejemplo, procedimientos legales).

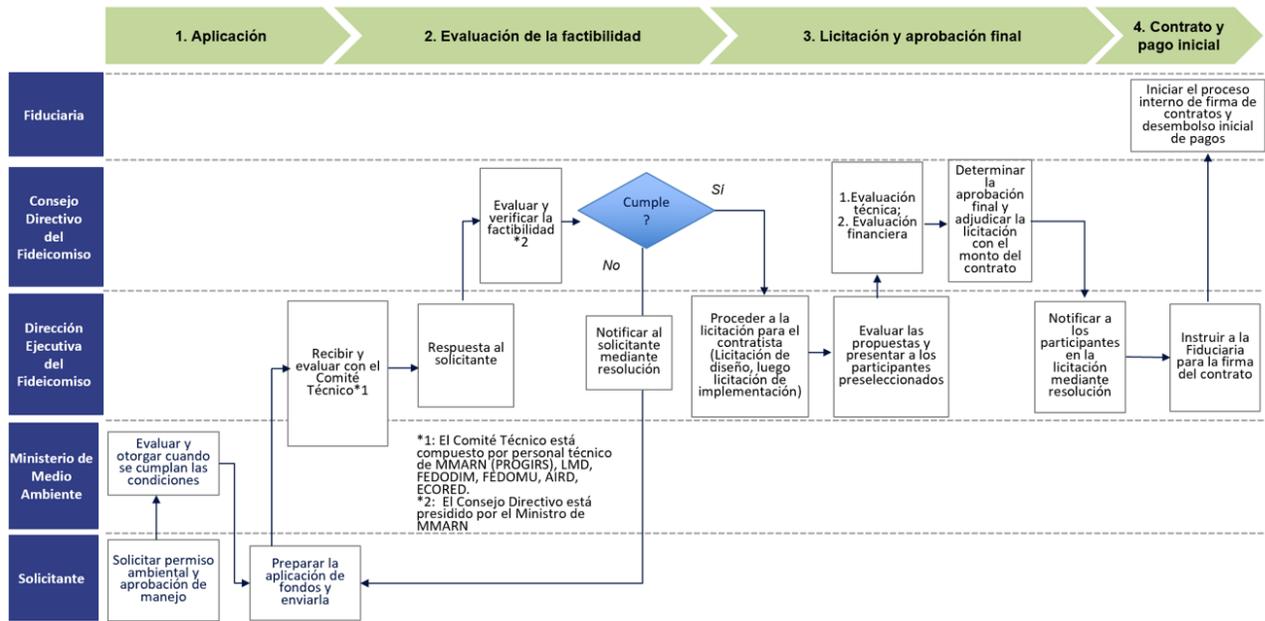
6.2 Financiamiento por parte del Fideicomiso

El Reglamento Técnico del Fondo Fiduciario (DO SOSTENIBLE), Resolución 0031/2022 del MMARN y el Reglamento para la Evaluación, Uso y Destino de los Fondos del Fideicomiso Público-Privado [DO] Sostenible, contienen las condiciones y requisitos para solicitar fondos de esta entidad.

6.2.1 Solicitud de aprobación

Los solicitantes elegibles son los municipios, las mancomunidades y las empresas privadas.

El flujo básico de la solicitud de desembolso se describe en la siguiente figura:



Fuente: Equipo de expertos de JICA

Figura 44: Flujo básico de aplicación al Fideicomiso para desembolso

Para solicitar financiamiento al Fideicomiso para la construcción de un relleno sanitario nuevo, el solicitante debe presentar los siguientes documentos:

- Identificación del proyecto y su titular, en caso de personas jurídicas, copia del Certificado de Registro Mercantil vigente y del Acta de inscripción al Registro Nacional de Contribuyentes (RNC), así como la documentación que avale el representante legal de la entidad y copia de su documento de identidad.
- Permiso, Licencia o Autorización Ambiental otorgado por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, así como el Plan de Manejo Ambiental vigente.
- Dictamen técnico favorable emitido por el Programa de Gestión Integral de Residuos Sólidos del MMARN, acompañado de toda la documentación que sirve de soporte al mismo.
- Documentación que avale el estatus jurídico del inmueble donde el titular del proyecto realizara el mismo. Esta documentación debe garantizar que no existen procesos de ejecución inmobiliaria o Litis de derechos registrados o cualquier otro tipo de conflicto legal.
- Autorización de manejo de residuos sólidos y/o autorización para actuar como prestador de servicios de manejo de residuos sólidos emanada por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Declaración jurada que valide que el proyecto de gestión integral de residuos reúne las condiciones y requisitos estipulados en la Ley núm. 225-20, de acuerdo con el tipo de actividad de gestión y manejo de residuos que se trate.
- Autorización emitida por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, si aplica, a favor del Proyecto para el desarrollo de las actividades vinculadas a la gestión o manejo de residuos.
- Póliza de Responsabilidad Civil vigente que garantice una cobertura mínima de RDS\$50,000,000.00.

- Declaración jurada emitida por la sociedad declarando la licitud del origen de los fondos destinados a la ejecución del proyecto.

Además, el Reglamento para la Evaluación, Uso y Destino de los Fondos del Fideicomiso Público-Privado [DO] Sostenible requiere los siguientes documentos:

- Fianza ambiental para garantizar la reparación de los daños que se pudieran causar por la generación de residuos especiales y peligrosos durante la prestación de servicios en esta materia y al término de este, incluyendo los daños por la contaminación al medio ambiente, así como la remediación del sitio;
- Garantías financieras para el cumplimiento de las obligaciones derivadas de las autorizaciones otorgadas, a ser fijadas por el Consejo Directivo mediante resolución.

Documentación sobre la situación financiera del proponente, que incluya:

1. Estados financieros de los últimos tres períodos fiscales, preparado por un contador público autorizado (CPA);
2. Corte de cuentas o balanza de comprobación del último mes cerrado a la fecha de presentación;
3. Estados de cuentas bancarias de los últimos tres meses cerrados a la fecha de presentación, certificado por la entidad o entidades financieras titulares de dichas cuentas;
4. Certificación de origen de fondos, legalizada por un notario público autorizado.
5. Modelo económico financiero del proyecto y/o actividad, incluyendo gastos operativos (CAPEX), de capital (OPEX), flujos de caja y estados financieros presupuestados en un plazo no menor a cinco años, especificando por lo menos la generación de fondos, gastos aplicados en la operación, costos financieros y saldos disponibles en la caja al cierre de cada período proyectado.

6.2.2 Desembolso

Está previsto que los fondos del Fideicomiso se desembolsen directamente desde el banco fiduciario a las empresas privadas (contratistas).

6.3 Financiamiento de los costos restantes

6.3.1 Presupuesto de desarrollo de los municipios

De acuerdo con la Ley 176-07, los municipios y distritos nacionales deben destinar el 40% de su presupuesto al desarrollo de infraestructuras sociales y económicas. Se espera que cada municipio financie el resto de los costos con este presupuesto de desarrollo, teniendo en cuenta una asignación presupuestaria equilibrada a otros proyectos de desarrollo.

6.3.2 Préstamos

Se recomienda explorar la opción del préstamo en caso de que el presupuesto de desarrollo sea insuficiente para cubrir los costos restantes. La ventaja de pedir un préstamo en lugar de pagar durante el período de construcción (2-3 años) es que el municipio puede pagar en cuotas a largo plazo, por lo que cada cuota (servicio de la deuda) es menor. El importe del servicio de la deuda anual puede preverse, por lo que es más fácil planificar el presupuesto.

Es conveniente que la fuente del servicio de la deuda sean los ingresos de la tarifa del servicio de gestión de residuos, y el presupuesto de desarrollo deberá cubrir el déficit, si lo hubiera.

6.3.3 Tarifa por servicio de gestión de residuos

De acuerdo con el Art. 16 de la Ley 225-20, los municipios son responsables de fijar la tarifa del servicio de gestión de residuos y de establecer un sistema de cobro. Aunque la determinación del método de cálculo de la tarifa es responsabilidad del MMARN (Art. 14), los municipios deben ultimar las tarifas teniendo en cuenta diversos factores, como los costos que deben cubrirse, la capacidad de pago del usuario y su disposición a pagar.

El punto de referencia de la capacidad de pago de los hogares es el 1% de la renta disponible. A modo de referencia, la siguiente tabla muestra la renta disponible media de los hogares en RD y la capacidad de pago mensual/hogar (2021), estimada a partir de la encuesta de ingresos/gastos de los hogares realizada por el Banco Central (2018).

Tabla 9: Estimación de la renta media disponible de los hogares y de la capacidad de pago (2021)

Clasificación	2021 Renta mensual (a)	2021 Renta anual (b)	Impuesto sobre la renta (c)	Renta anual disponible (d)	Renta mensual disponible (e)	Capacidad de pago mensual (f)
Fórmula		$(b) = (a) * 12$	Impuesto aplicado	$(d) = (b) - (c)$	$(e) = (d) / 12$	$(f) = (e) * 1\%$
Promedio Nacional	47,282	567,382	22,674	544,708	45,392	454
Área Urbana	50,372	604,469	28,237	576,231	48,019	480
Área Rural	33,582	402,983	-	402,983	33,582	336
Gran SD	56,987	683,841	43,118	640,722	53,394	534
Región Norte	44,766	537,193	18,146	519,047	43,254	433
Región Este	41,254	495,047	11,824	483,223	40,269	403
Región Sur	35,361	424,335	1,217	423,118	35,260	353

Fuente: Equipo de expertos de JICA

La disposición a pagar de los ciudadanos suele ser mucho menor que la capacidad de pago. En tal sentido, se recomienda a los municipios que actúen con antelación para sensibilizarlos sobre el tema.

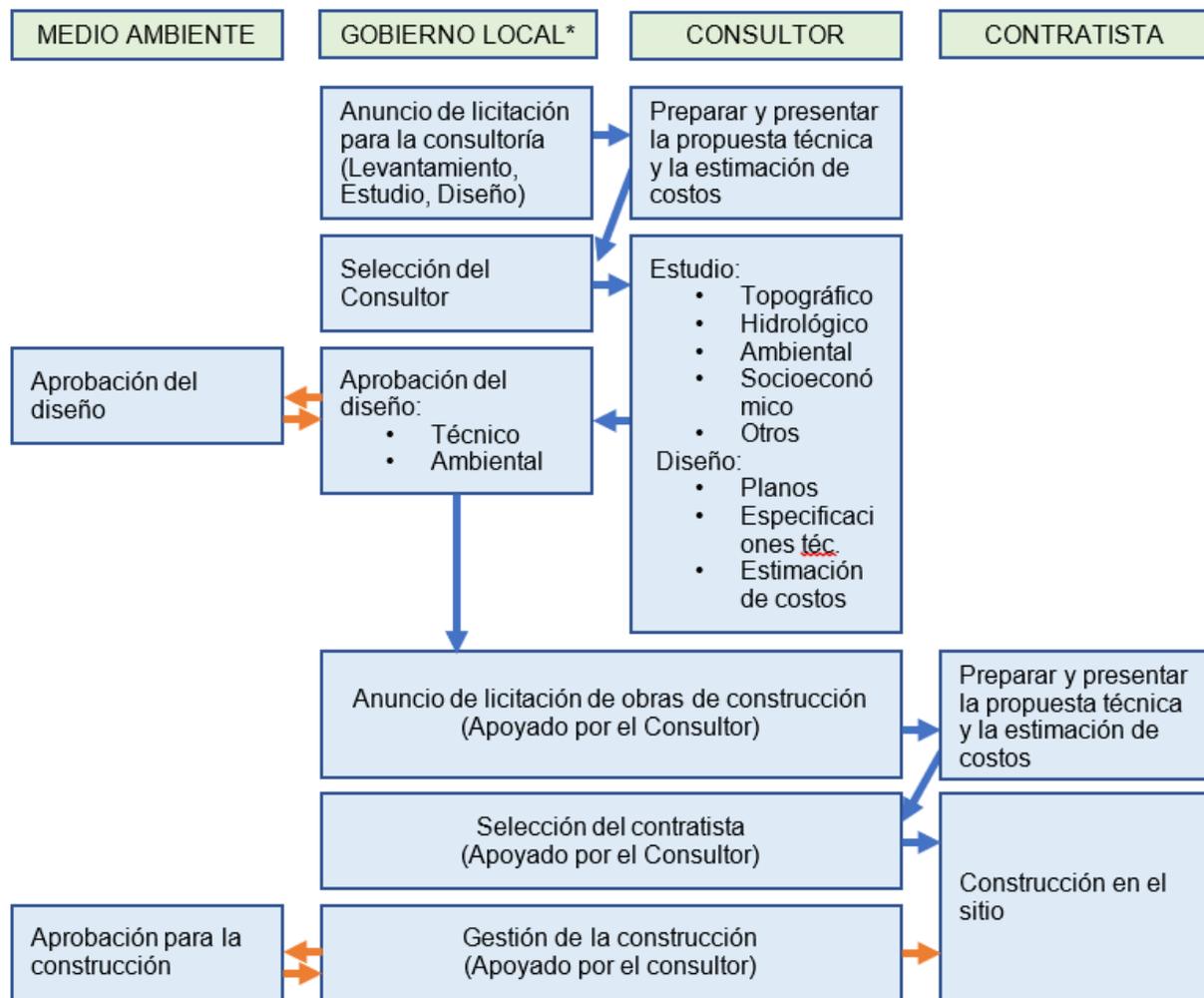
6.4 Proceso de gestión de compra o adquisición

El Municipio/DM o Mancomunidad como entidad del proyecto, es responsable de seleccionar a los contratistas y de gestionar los resultados de la planificación, el diseño y la construcción. El Ministerio de Medio Ambiente, en su papel de guía para los Municipios/DM o Mancomunidades, confirma y aprueba los resultados del diseño y la construcción a través de aplicaciones relacionadas con el plan de desarrollo de las instalaciones.

Los Municipios/DM o Mancomunidades llevarán a cabo la planificación y el diseño, la selección de contratistas y la supervisión de la construcción. Los Municipios/DM o Mancomunidades pueden contratar a un consultor para que les ayude en estas actividades, según sea necesario.

Los trabajos de construcción los lleva a cabo el contratista seleccionado en base al contrato con la entidad correspondiente (municipio/DM, mancomunidad o el Fideicomiso)

La Figura 45 muestra el flujo del procedimiento de orden de construcción:



*Municipios o Mancomunidades

Fuente: Equipo de expertos de JICA

Figura 45: Flujo del procedimiento de orden de construcción

6.5 Consideraciones durante la construcción

Durante la construcción de un SDF se deben tomar las precauciones necesarias y realizar actividades de verificación y control de la calidad del proceso constructivo, así como también se deben implementar una serie de medidas y acciones de cara al control de los impactos ambientales.

6.5.1 Inspección general de la construcción del relleno sanitario

Los aspectos críticos objeto de inspección durante la construcción de un relleno sanitario se muestran en la Tabla 10 y están relacionados con los principales sistemas de protección del suelo y subsuelo, así como del aire circundante.

Tabla 10: Construcción general de rellenos - Puntos críticos de la inspección

Construcción del relleno	Cuando	Frecuencia
1.0 Construcción del recubrimiento del suelo	En cada uno de los eventos de construcción	Por lo menos una vez por evento
2.0 Construcción del recubrimiento de la geomembrana.		
3.0 Construcción de la capa para la recolección de lixiviados.		
4.0 Recubrimiento construido por debajo de nivel freático estacional máximo.		
5.0 Documentación e informes sobre la construcción del recubrimiento		
6.0 Construcción de pozos para el monitoreo de aguas subterráneas		
7.0 Construcción de sonda para el monitoreo de biogás		
8.0 Control de calidad de la construcción de tiempo completo en el sitio		

Fuente: Manual de Protocolo de Construcción Nuevos Rellenos Sanitarios con Revestimientos Compuestos (CCAD 2010)

6.5.2 Instalación del recubrimiento con geomembrana

La geomembrana no se debe colocar cuando existan condiciones meteorológicas inclementes, como lluvias o vientos fuertes.

El agua de la lluvia se debe redirigir y alejar de la celda recubierta, mediante la construcción de canales de redireccionamiento y diques o bien al readaptar áreas que drenen hacia la celda.

- La instalación de geomembrana y el sellado no se realizará mientras esté lloviendo o si el relleno está experimentando una humedad excesiva que pueda mojar el recubrimiento.
- En todo momento debe haber una bomba para aguas pluviales para bombear el agua de la celda de desechos. Esta bomba deberá ser lo suficientemente grande para eliminar el agua estancada en la celda de desechos en un día.

- Durante los períodos de vientos fuertes, el despliegue se debe detener y todas las orillas expuestas del recubrimiento se deberán reducir. Esto se puede lograr con pilas de suelo, maquinaria con recubrimiento de hule, rollos de material geosintético, bolsas de arena u otros materiales pesados que no dañen la geomembrana.
- No se debe permitir tráfico vehicular sobre la geomembrana antes de la colocación de las capas de recolección de lixiviados o bien las capas de cobertura protectoras. Los únicos vehículos que se pueden permitir sobre la geomembrana son los vehículos de presión baja sobre el suelo.
- Al personal que esté trabajando en la geomembrana no se le permitirá fumar, portar zapatos que ocasionen daños o involucrarse en otras actividades que puedan dañar la geomembrana.
- El recubrimiento se debe asegurar en la parte superior con una zanja de anclaje diseñada para el peso del recubrimiento. La zanja de anclaje excavada deberá tener orillas redondeadas para poder ayudar a proteger la geomembrana.
- No se debe permitir que suelo flojo quede debajo de la geomembrana en la zanja de anclaje. La excavación de la zanja de anclaje no se deberá hacer con demasiada anticipación del despliegue de la geomembrana.
- Solamente se deben desenrollar las láminas de geomembrana que se colocarán y sellarán en el mismo día. Las láminas se deben colocar con el traslape recomendado por el fabricante.
- Las arrugas se deben eliminar tanto como sea posible antes de sellar el campo. Todas las materias extrañas (basura, agua, aceite, etc.) se deben eliminar del área que se va a unir.

6.5.3 Instalación del sistema de recolección del lixiviado

- Los materiales granulares (lavados de ser necesario) se deben colocar y esparcir por medio del uso de equipo y métodos que minimicen la generación de material fino.
- Los materiales granulares no deben recibir ninguna compactación aparte de la que fuera incidental durante el proceso de colocación y esparcimiento.
- Todos los materiales de suelo que se colocan sobre una geomembrana u otros geosintéticos, como parte del sistema de recolección del lixiviado se deben colocar durante la parte más fresca del día y se deben desplegar en «tramos» a lo largo de la superficie para controlar la cantidad de holgura y minimizar arrugas y pliegues en la geomembrana.

7. FUENTES BIBLIOGRÁFICAS

1. Alexandra, L. V. S. (2002). Cierre técnico del botadero a cielo abierto del cantón Mejía utilizando el programa HELP. <http://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/396>
2. Hernández, C., & Wehenpohl, G. (2000). MANUAL PARA LA REHABILITACIÓN, CLAUSURA Y SANEAMIENTO DE TIRADEROS A CIELO ABIERTO EN EL ESTADO DE MÉXICO. <http://www.resol.com.br/textos/GTZ-SEGEM-ManualClausura.pdf>
3. MMAyA/VAPSB/DGGIRS, Bolivia (2012). Guía para el Cierre Técnico de Botaderos
4. MMAyA/VAPSB/DGGIRS, Bolivia (2012). Guía para el Diseño Construcción, Operación, Mantenimiento y Cierre de Rellenos Sanitarios
5. USAID – CCAD (2010). MANUAL DE PROTOCOLO DE CONSTRUCCIÓN DE NUEVOS RELLENOS SANITARIOS CON REVESTIMIENTOS COMPUESTOS
6. Jorge Jaramillo (2002). GUÍA PARA EL DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS MANUALES
7. SEMARNAT (2009). MANUAL DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE RELLENOS SANITARIOS PARA RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) Y RESIDUOS DE MANEJO ESPECIAL (RME)
8. Entidad Municipal de Aseo Villazón (2018). MANUAL DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE RELLENOS SANITARIOS PARA RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) Y RESIDUOS DE MANEJO ESPECIAL (RME)”
9. SEDESOL. MANUAL PARA LA OPERACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS
10. Secretaría de Estado de Relaciones Públicas y Comunicaciones, Dirección General de Reglamentos y Sistemas (1987). RECOMENDACIONES PROVISIONALES PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE DRENAJE EN CARRETERAS
11. (2019). Guía para la construcción de rellenos sanitarios en municipios del norte de Boyacá. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/10901/20294>.
12. Weihs, J. P. (2012). Fundamentos sobre los Rellenos Sanitarios. https://www.globalmethane.org/documents/events_land_20110627_weihs.pdf
13. Jiménez, T. (2021). Generación de lixiviados en vertederos [Trabajo Fin de Grado]. Universidad de Sevilla.
14. Prefecture of Fukuoka. (s. f.). Guide to Introducing The Fukuoka Method. https://www.pref.fukuoka.lg.jp/uploaded/life/640985_61334511_misc.pdf

