

DOCUMENTO BASE PARA LA ELABORACIÓN DE

GUÍA Y PAUTAS TÉCNICAS PARA LOCALIZACIÓN, DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y CLAUSURA DE RELLENOS SANITARIOS DE RESIDUOS SÓLIDOS¹

¹ Documento preparado por Ing. Mariana Robano Aldaya – Agosto 2017

OBJETIVO	7
ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	7
1 INTRODUCCIÓN.....	9
2 REQUERIMIENTOS DE AUTORIZACION DE RELLENOS SANITARIOS	11
2.1 OBJETIVO.....	11
2.2 NORMATIVA AMBIENTAL APLICABLE.....	11
2.2.1 Autorización Ambiental Previa	11
3 LINEAMIENTOS INICIALES	13
3.1 OBJETIVO.....	13
3.2 VISIÓN GENERAL DEL PROCESO DE IMPLANTACIÓN	13
3.3 LINEAMIENTOS INICIALES	14
3.3.1 ¿Cuándo es necesario que esté operativo el nuevo relleno?.....	14
3.3.2 ¿Dará servicio a un solo departamento o a más?	14
3.3.3 ¿Cómo se integra el relleno con otras iniciativas en residuos?.....	14
3.3.4 ¿Cómo se financia la construcción y operación?.....	14
3.3.5 ¿Quién será responsable de la operativa?	15
3.3.6 ¿Es posible asegurar los recursos para la operación del nuevo relleno?	15
3.3.7 ¿Cómo se manejará la participación de los actores de la sociedad?	15
3.3.8 Costos asociados a un relleno sanitario.....	16
4 SELECCIÓN DE SITIOS Y CRITERIOS DE LOCALIZACIÓN	18
4.1 OBJETIVO.....	18
4.2 SÍNTESIS DEL PROCESO DE SELECCIÓN DE SITIO.....	18
4.3 CÁLCULO DEL ÁREA REQUERIDA.....	19
4.3.1 Residuos a disponer en el relleno.....	19
4.3.2 Vida útil.....	20
4.3.3 Total de residuos a disponer.....	20
4.3.4 Densidad de residuos compactados	20
4.3.5 Volumen ocupado por la cobertura diaria	20
4.3.6 Área ocupada por infraestructura auxiliar.....	20
4.4 CRITERIOS DE LOCALIZACIÓN.....	21
4.4.1 Paso 1: Mapear los criterios de exclusión.	23
4.4.2 Paso 2: Mapear los criterios de aptitud para comparar sitios.....	24
4.4.3 Paso 3: Realizar visitas técnicas a los sitios	29
4.4.4 Paso 4: Estimación de costos diferenciales	29
4.4.5 Paso 5: Realizar estudios básicos en el sitio candidato	29
4.4.6 Paso 6: Decisión por parte de autoridades.....	30

5	DISEÑO DEL RELLENO SANITARIO.....	31
5.1	OBJETIVO.....	31
5.2	CONTENIDOS DEL PROYECTO DE RELLENO SANITARIO	31
5.3	INFORMACIÓN DE BASE DEL SITIO.....	32
5.3.1	Descripción del entorno	32
5.3.2	Estudio geológico.....	32
5.3.3	Estudio hidrogeológico	33
5.3.4	Estudio hidrológico	33
5.3.5	Relevamiento topográfico	33
5.3.6	Recopilación de datos meteorológicos.....	33
5.4	DEFINICIONES Y CÁLCULOS BÁSICOS	34
5.4.1	Criterios de admisión	34
5.4.2	Residuos no admisibles.....	34
5.4.3	Caracterización de los residuos a disponer	34
5.4.4	Estimación de la cantidad de residuos	35
5.4.5	Método de operación de un relleno sanitario.....	36
5.4.6	Estación de transferencia	37
5.5	COMPONENTES DEL RELLENO SANITARIO.....	38
5.5.1	Plan de llenado	41
5.5.2	Previsión de personal para la operación	42
5.5.3	Maquinaria necesaria para la operación	44
5.5.4	Especificaciones para la impermeabilización de fondo y paredes laterales.....	45
5.5.5	Gestión del lixiviado.....	48
5.5.6	Gestión del biogás.....	53
5.5.7	Gestión del agua superficial.....	56
5.6	INFRAESTRUCTURA CONEXA.....	58
5.6.1	Acceso al predio y cerco perimetral	58
5.6.2	Iluminación	58
5.6.3	Cartelería indicativa.....	58
5.6.4	Ingreso al relleno	59
5.6.5	Caminería interna	60
5.6.6	Barrera vegetal y zonas de amortiguamiento	61
5.6.7	Oficinas y vestuario para el personal.....	61
5.6.8	Taller y depósito de máquinas y herramientas	61
5.6.9	Almacenamiento de combustible.....	62
5.6.10	Instalación del sistema de incendios	62

5.7	SÍNTESIS DE LA INFRAESTRUCTURA NECESARIA POR TAMAÑO DE RELLENO	62
5.8	INFRAESTRUCTURA DE CONTROL AMBIENTAL.....	63
5.8.1	Control de aguas subterráneas.....	63
5.8.2	Control de aguas superficiales.....	64
5.8.3	Control de las descargas de lixiviado tratado	64
5.8.4	Control de gases, olores, vectores, aves, voladuras.	64
6	CONSTRUCCIÓN	65
6.1	OBJETIVO.....	65
6.2	CONTROLES DE CALIDAD A REALIZAR DURANTE LA OBRA	65
6.2.1	Controles de calidad de la impermeabilización de celdas.....	65
6.2.2	Control del sistema de drenaje.....	69
6.2.3	Control de las perforaciones para el monitoreo de agua subterránea	69
6.2.4	Otros controles	69
7	OPERACIÓN.....	70
7.1	OBJETIVO.....	70
7.2	PLAN DE OPERACIÓN	70
7.3	RECEPCIÓN DE RESIDUOS	71
7.3.1	Control de acceso	71
7.3.2	Pesaje en balanza y vigilancia	71
7.4	DISPOSICIÓN DE RESIDUOS.....	72
7.4.1	Plan de avance del relleno.....	72
7.4.2	Tránsito y descarga de camiones.....	74
7.4.3	Distribución y compactación efectiva de los residuos.....	74
7.4.4	Cobertura de las celdas.....	75
7.4.5	Drenaje del área de trabajo	76
7.4.6	Disposición de residuos especiales.....	76
7.5	MANTENIMIENTO Y CONTROL GENERAL DEL SITIO.....	76
7.5.1	Mantenimiento de maquinaria.....	76
7.5.2	Mantenimiento de caminería y drenajes pluviales	77
7.5.3	Mantenimiento de cortina vegetal, áreas verdes y limpieza de predio.	77
7.5.4	Control de voladuras.....	77
7.5.5	Control de olores	78
7.5.6	Control de plagas y vectores.....	78
7.5.7	Gestión de lixiviado.....	78
7.5.8	Gestión del biogás.....	79
7.5.9	Prevención y combate de incendios	79

7.5.10	Tareas especiales en días de lluvia	79
7.6	SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL.....	80
7.6.1	Capacitación del personal.....	80
7.6.2	Equipo de protección personal.....	81
7.6.3	Planes de contingencia	81
7.6.4	Registro de incidentes	81
7.7	PLAN DE GESTIÓN AMBIENTAL	81
7.7.1	Plan de monitoreo ambiental	82
7.7.2	Registros	82
8	CLAUSURA Y POST-CLAUSURA.....	83
8.1	OBJETIVO.....	83
8.2	OBRAS DE CLAUSURA DE CELDAS DE RELLENO	83
8.2.1	Cobertura final	83
8.2.2	Adecuación de las chimeneas.....	84
8.2.3	Adecuación de la caminería interna	84
8.2.4	Adecuación de la gestión de pluviales.....	84
8.2.5	Adecuación de la cartelería e instalaciones.....	84
8.3	POSIBLES USOS FUTUROS DEL ÁREA.....	84
8.4	TAREAS DE POST-CLAUSURA.....	85
8.4.1	Mantenimiento de cobertura final	85
8.4.2	Mantenimiento de la caminería	85
8.4.3	Mantenimiento de la red de pluviales.....	85
8.4.4	Mantenimiento paisajístico	85
8.4.5	Monitoreo de asentamientos	85
8.4.6	Monitoreo ambiental.....	85
9	ANEXOS	87
9.1	TIPOS DE RELLENOS SANITARIOS.....	87
9.1.1	Relleno semi-aeróbico	87
9.1.2	Relleno anaeróbico	88
9.2	MÉTODO DE LLENADO DE UN RELLENO SANITARIO.....	88
9.2.1	Rellenos de área	88
9.2.2	Rellenos de celda excavada	89
9.2.3	Método de pendiente.....	89
9.2.4	Método combinado	89
9.3	CARACTERÍSTICAS Y CANTIDADES DE EN URUGUAY.....	91
9.3.1	Caracterización de residuos sólidos.....	91

DOCUMENTO BASE PARA LA ELABORACIÓN DE
Guía y pautas técnicas de rellenos sanitarios de residuos sólidos

9.3.2	Cantidades generadas.....	92
9.4	GENERACIÓN DE LIXIVIADO	93
9.4.1	Balance hídrico G. Tchobanoglous.....	93
9.4.2	Balance hídrico.....	94
9.4.3	Método suizo	96
9.4.4	Método alemán	96
9.5	SEPARACIÓN ENTRE DRENES	96
9.6	MODELOS PARA ESTIMAR LA GENERACIÓN DE BIOGÁS.....	97
9.7	MÉTODO RACIONAL.....	98
9.8	FÓRMULA DE MANNING.....	99
9.9	CÁLCULO MAQUINARIA NECESARIA	100
10	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
10.1	CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	101
10.2	CAPÍTULO 2: REQUERIMIENTOS DE AUTORIZACIÓN	101
10.3	CAPÍTULO 3: LINEAMIENTOS INICIALES	101
10.4	CAPÍTULO 4: SELECCIÓN DE SITIOS	101
10.5	CAPÍTULO 5: DISEÑO DEL RELLENO SANITARIO.....	101
10.6	CAPÍTULO 6: CONSTRUCCIÓN	102
10.7	CAPÍTULO 7: OPERACIÓN	102
10.8	CAPÍTULO 8: CLAUSURA Y POST-CLAUSURA.....	103
10.9	CAPÍTULO 9: ANEXOS	103

OBJETIVO

Un relleno sanitario es una técnica de ingeniería para el confinamiento de los residuos. Comprende el acomodo y la compactación de los residuos sobre un lecho impermeable, el manejo adecuado de gases y los lixiviados, con el fin de evitar la contaminación del ambiente y proteger la salud de la población.

Su concepción y operación abarca aspectos logísticos, administrativos, de recursos humanos, de manejo de información y de ingeniería, entre otros.

La fase de diseño debe anticiparse a todas las necesidades de la gestión para que puedan ser satisfechas en la fase operativa. Con este enfoque, esta guía busca dar pautas para la selección de sitio, diseño, construcción, operación y clausura de rellenos sanitarios. El resultado que se busca es poder lograr soluciones con un alto grado de planificación y diseño que permitan una adecuada operación.

Este documento está dirigido a Autoridades, tomadores de decisión y equipos asesores, a fin de mostrar las definiciones estratégicas necesarias que se deben tomar para dirigir el proceso. Ellas serán condiciones o restricciones sobre las cuales los equipos técnicos hagan sus desarrollos.

También está dirigido a los equipos técnicos de los Gobiernos Departamentales, para que en su rol de contrapartes conozcan los requerimientos de los estudios básicos y elementos clave de los proyectos esperados. Por otro lado, se busca que técnicos, como ser proyectistas de rellenos sanitarios y otras especialidades, se adecuen a dichos requerimientos.

Finalmente debe destacarse que esta guía debe ser complementada con la bibliografía técnica especializada.

ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

A través de la lectura secuencial de la Guía se espera que el lector realice un proceso tal que al final haya definido todos los aspectos claves para contar con un proyecto de relleno sanitario completo. El mismo podrá tener variantes dependiendo de la escala, la realidad económica, la ubicación, etc.

La presente Guía está compuesta por diez capítulos, el capítulo 1: INTRODUCCIÓN plantea conceptos generales sobre gestión integral de residuos y las responsabilidades de los distintos actores intervinientes en el sistema.

El capítulo 2: REQUERIMIENTOS DE AUTORIZACIÓN DE RELLENOS SANITARIOS plantea la normativa ambiental aplicable a todo relleno sanitario.

El capítulo 3: LINEAMIENTOS INICIALES está dirigido a tomadores de decisiones, los cuales deben de realizar ciertas definiciones preliminares antes de comenzar la búsqueda y el diseño de un nuevo sitio para el emplazamiento de un relleno sanitario.

El capítulo 4: SELECCIÓN DE SITIOS Y CRITERIOS DE LOCALIZACIÓN tiene por objetivo presentar una metodología, basada en 6 pasos, de identificación y selección de sitios para emplazar un relleno sanitario para la disposición final de residuos sólidos.

El capítulo 5: DISEÑO DEL RELLENO SANITARIO describe los principales aspectos a considerar para proyectar un relleno sanitario, establece los estudios básicos requeridos y propone pautas para el diseño de cada componente de la infraestructura y obras de control ambiental necesarias para el monitoreo del adecuado funcionamiento del mismo.

El capítulo 6: CONSTRUCCIÓN plantea los controles específicos asociados a la construcción de un relleno sanitario.

El capítulo 7: OPERACIÓN plantea pautas para realizar una adecuada operación de un relleno sanitario, con el objetivo de prevenir y minimizar los posibles impactos ambientales derivados del enterramiento de residuos.

El capítulo 8: CLAUSURA Y POST-CLAUSURA presenta las actividades y obras necesarias para la realización de una clausura adecuada, así como los mantenimientos y monitoreos a realizar en la etapa post-clausura.

El capítulo 9: ANEXOS presenta la información complementaria para cada capítulo.

El capítulo 10: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS, plantea las referencias bibliográficas utilizadas en cada capítulo de la Guía.

1 INTRODUCCIÓN

La gestión integral de residuos sólidos comprende las etapas de minimización de la generación (evitar y reducir), separación, almacenamiento, recolección, transporte, reutilización, reciclaje, tratamiento (biológico, químico, físico o térmico), y disposición final de residuos. La misma procura desarrollar dichas actividades contemplando aspectos sanitarios, ambientales, tecnológicos, económicos y sociales. Además promueve la participación co-responsable de todos los actores involucrados en las acciones tendientes a prevenir la generación y lograr la valorización.

La **Figura 1-1** muestra el principio de jerarquía para lograr una gestión integral de residuos (pirámide invertida). Dicha jerarquía plantea que los mayores esfuerzos deben realizarse en las etapas preventivas y de aprovechamiento, es decir, primero trabajar en minimizar la generación de residuos, luego en su recuperación ya sea para su reuso o reciclaje para luego pasar a las siguientes etapas de la gestión.

Figura 1-1: Jerarquía en la gestión de residuos

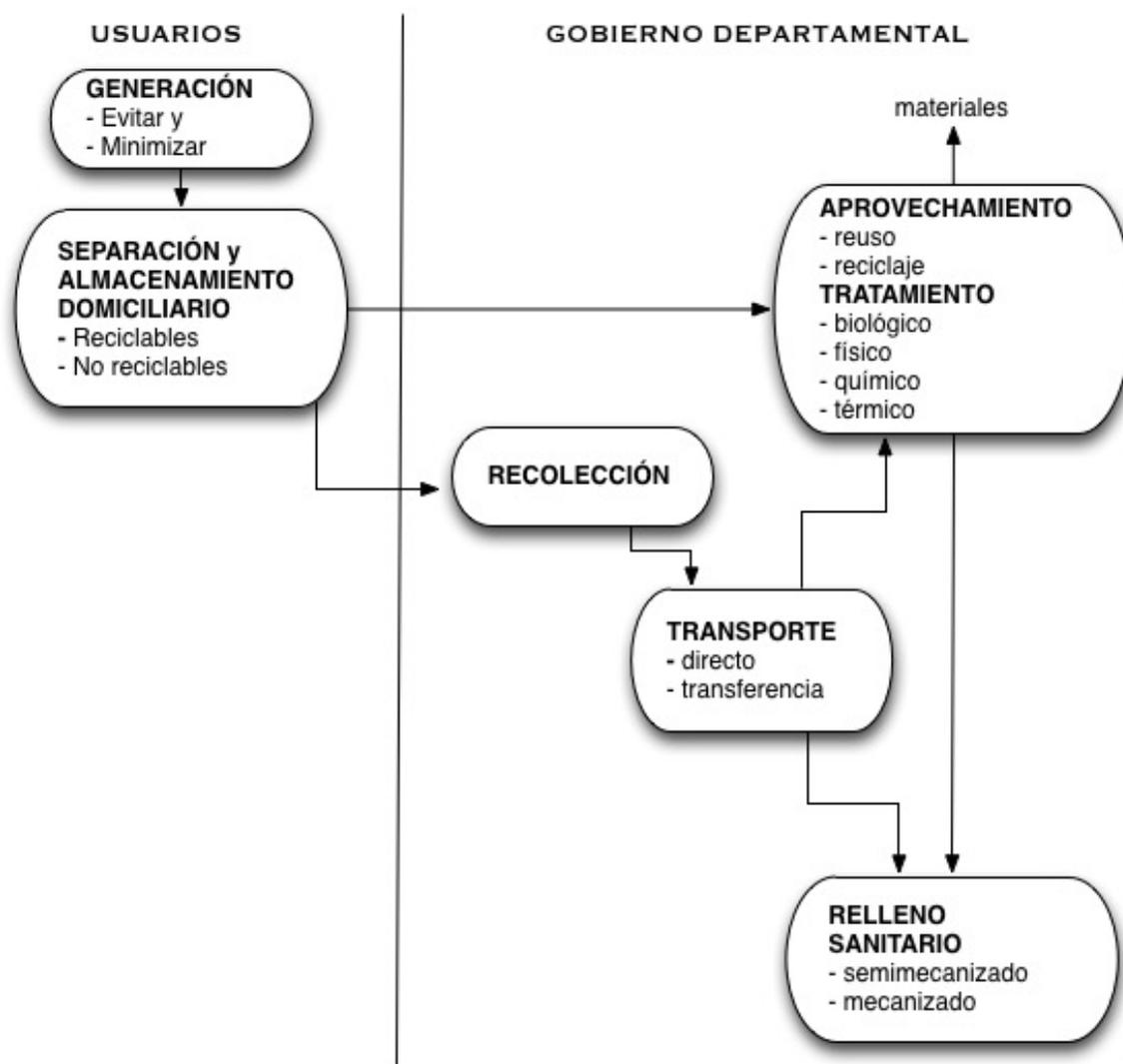


Los Gobiernos Departamentales, siguiendo las pautas y lineamientos establecidos por la política a nivel nacional, tienen a su cargo la planificación a nivel operativo a fin de brindar el servicio de barrido, recolección, transporte, valorización y disposición final de los residuos sólidos. Las actividades de minimización, separación y almacenamiento domiciliario son responsabilidad de los ciudadanos. La **Figura 1-2** representa esto en forma esquemática.

La recuperación de materiales a partir de residuos comienza con la clasificación en origen, es decir, separar los residuos en los domicilios en distintas fracciones o materiales. Si bien para algunas fracciones esto puede complementarse luego con una separación posterior en plantas de clasificación, una clasificación en origen pobre o deficiente muchas veces disminuye la calidad de los materiales recuperados e inclusive puede llegar a inviabilizar su recuperación. Se recomienda que la recuperación de materiales sea realizada en plantas de clasificación, con residuos limpios preclasificados en los domicilios. Las plantas de clasificación son instalaciones que pueden estar en las cercanías del relleno sanitario, sin embargo su gestión debe ser independiente del mismo y como tal no interferir en la operativa del relleno. En ningún caso la separación se podrá realizar en el frente de trabajo de un relleno sanitario.

La separación en fracciones en los hogares (separación en origen), es un paso fundamental para la recuperación efectiva de los materiales y la valorización de los residuos. Y es responsabilidad de la población (generadores) realizar la separación.

Figura 1-2: Etapas de un sistema de gestión integral de residuos sólidos domiciliarios (adaptado de [1])



El principio de jerarquía establece que la disposición final es la menos deseable de las alternativas. Sin embargo en el escenario de implantación de mejoras en la gestión integral de gestión de residuos, la construcción de rellenos sanitarios de calidad es de las primeras etapas a abordar, a la vez que se ejecutan estrategias para la reducción de la cantidad de residuos a disponer y el desarrollo de alternativas de aprovechamiento y tratamiento. Es decir, que resulta prioritario mitigar los impactos a la salud humana y el medio ambiente generados por la actualmente deficiente disposición final de residuos sin postergar el desarrollo las capacidades de valorización.

La disposición final es una componente inevitable en todo sistema de gestión de residuos. Aún cuando el sistema esté basado en la recuperación de materiales y/o el aprovechamiento energético, estos procesos generan residuos que necesariamente deben ser dispuestos en forma adecuada, mitigando los potenciales impactos a la salud humana y el medio ambiente.

2 REQUERIMIENTOS DE AUTORIZACION DE RELLENOS SANITARIOS

2.1 OBJETIVO

Este capítulo tiene como objetivo encuadrar el desarrollo del proyecto en la normativa ambiental aplicable y los requerimientos para su Autorización Ambiental Previa. De manera de tener una visión clara del proceso de autorización, para hacer un buen aprovechamiento de las etapas de planificación y diseño.

2.2 NORMATIVA AMBIENTAL APLICABLE

La normativa ambiental aplicable a todo proyecto de relleno sanitario se lista a continuación:

- Ley General de Protección al Ambiente Ley N°17.283
- Ley de Impacto Ambiental No 16.466 y su Decreto Reglamentario N°349/005
- Ley Orgánica Municipal N°9.515
- Ley de Ordenamiento Territorial y Desarrollo Sostenible N°18.308 y Planes de Ordenamiento Territorial Departamentales
- Ley prevención de la contaminación acústica N°17.852 y propuesta de normativa Gesta-Aire.
- Normas reglamentarias para prevenir la contaminación ambiental mediante el control de las aguas Decreto N°253/79 y modificativos
- Normativa departamental aplicable según el caso
- Otras.

En particular se detallan a continuación los trámites a realizar ante la DINAMA-MVOTMA para obtener las habilitaciones necesarias para la construcción y operación de un relleno sanitario.

2.2.1 Autorización Ambiental Previa

El Decreto N°349/05 establece que los rellenos sanitarios que reciban más de 10 ton/día deben obtener la Autorización Ambiental Previa del MVOTMA.

Dicho trámite comienza con la Solicitud de Viabilidad Ambiental de Localización (VAL), que se presenta luego de haber realizado el estudio de selección de sitio. Se propone un predio específico para la implantación del relleno sanitario y una vez que se obtiene la VAL, el proyecto es clasificado (A, B, o C) dependiendo de sus potenciales impactos ambientales.

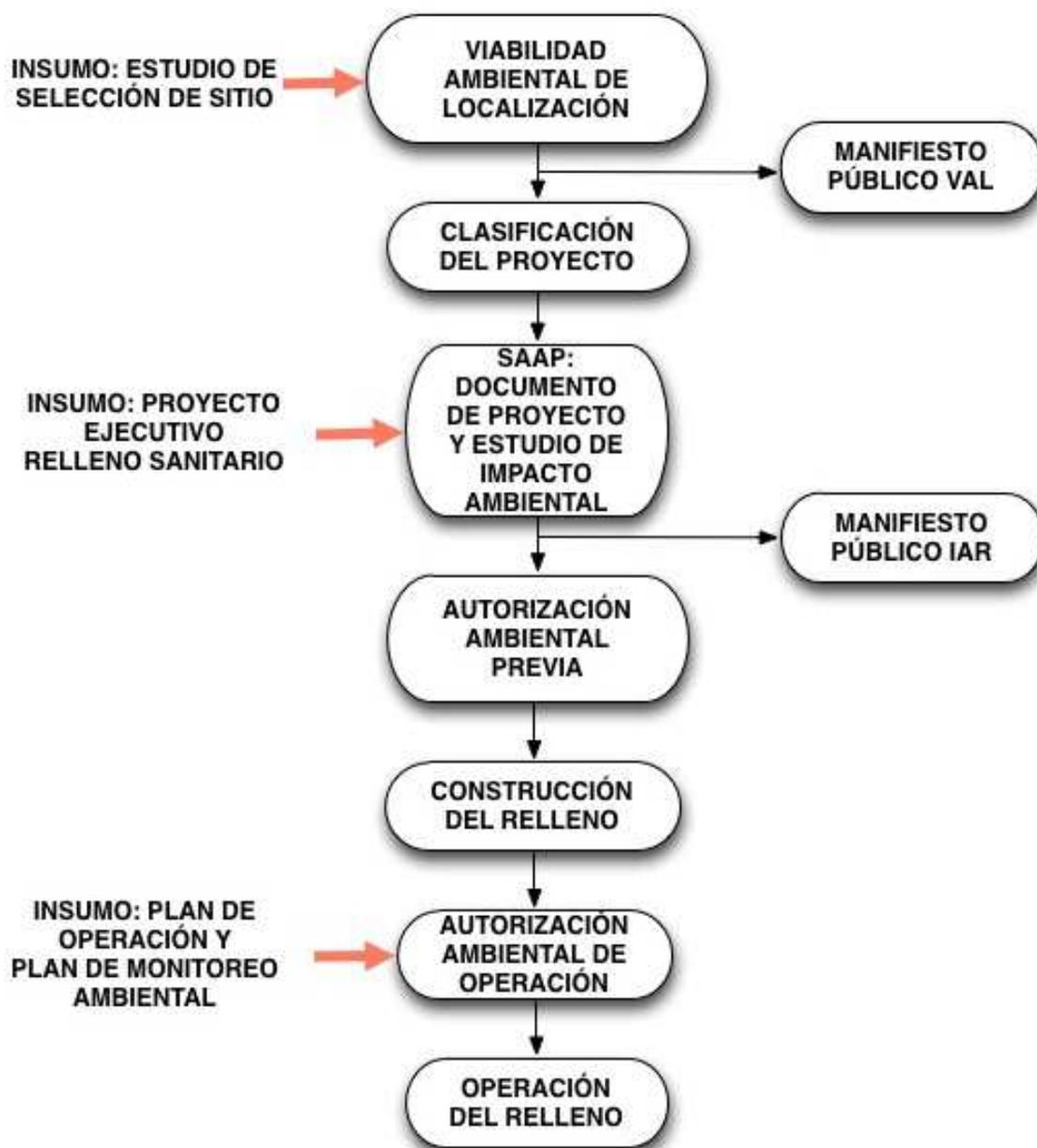
Luego, en caso de no haber sido clasificado como A, se presenta el Documento de Proyecto y el Estudio de Impacto Ambiental (EslA) de acuerdo a la clasificación recibida, para lo que es necesario contar con el proyecto ejecutivo del relleno.

A partir de la obtención de la Autorización Ambiental Previa (AAP) se puede comenzar la construcción. Cabe aclarar que la AAP establece un período para el comienzo de las obras (en general de 2 años) luego del cual se debe tramitar nuevamente la autorización.

Una vez finalizada la construcción del relleno se debe presentar para aprobación la Autorización Ambiental de Operación (AAO) que habilita la puesta en operación del relleno sanitario. La misma se otorga una vez constatado el cumplimiento de lo establecido en la AAP y su EslA y debe ser renovada cada 3 años.

La **Figura 2-1** resume lo expuesto:

Figura 2-1: Trámite para obtención de la AAP y la AAO ante la DINAMA



VAL: Viabilidad Ambiental de Localización

IAR: Informe Ambiental Resumen

SAAP: Solicitud de Autorización Ambiental Previa

3 LINEAMIENTOS INICIALES

3.1 OBJETIVO

Este capítulo, dirigido a las Autoridades y tomadores de decisión, tiene por objetivo brindar una visión general del proceso asociado a un relleno sanitario, a fin de que puedan tomar posición al respecto y dar lineamientos que orienten los desarrollos técnicos.

Los lineamientos establecidos aquí planteados, serán retroalimentados con los desarrollos planteados en los capítulos siguientes, de forma que luego de recorrer la guía en su totalidad se cuente con un concepto claro sobre los aspectos clave del proyecto.

3.2 VISIÓN GENERAL DEL PROCESO DE IMPLANTACIÓN

El proceso de implantación de un relleno sanitario comprende varias etapas, desde que se identifica la necesidad del mismo hasta el fin de su vida útil. La **Tabla 3-1** presenta dichas etapas y su orden cronológico.

Es de destacar que este proceso puede apoyarse en consultores externos a las intendencias, lo cual debe ser debidamente considerado con el fin de agilizar el proceso.

Tabla 3-1: Principales etapas asociadas a un relleno sanitario

ACTIVIDADES	ETAPAS										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
NECESIDAD DE UN NUEVO RELLENO SANITARIO											
1. LINEAMIENTOS INICIALES											
1.1	Búsqueda de otros departamentos socios										
1.2	Modalidad de construcción/operación										
1.3	Fuentes de financiamiento										
1.4	Estrategia de comunicación con la población										
LINEAMIENTOS DEFINIDOS											
2. SELECCIÓN DE SITIO											
2.1	Área requerida										
2.2	Criterios de localización										
SITIO SELECCIONADO											
3. VIABILIDAD AMBIENTAL DE LOCALIZACIÓN											
OBTENCIÓN DE LA VAL											
4. PLANIFICACIÓN Y DISEÑO											
4.1	Área servida										
4.2	Ingreso, egreso y control de admisión										
4.3	Información de base del sitio										
4.4	Componentes del relleno sanitario										
4.5	Servicios conexos										
4.6	Infraestructura de control ambiental										
PROYECTO EJECUTIVO DEL RELLENO SANITARIO											
5. SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN AMBIENTAL PREVIA											
OBTENCIÓN DE LA AAP											
6. SOLICITUD DE DESAGÜE INDUSTRIAL											
6.1	Proyecto de ingeniería del sistema de tratamiento de lixiviados										
APROBACIÓN PROYECTO INGENIERÍA TRTO. LIXIVIADOS											
7. CONSTRUCCIÓN											
7.1	Preparación del terreno										
7.2	Construcción infraestructura periférica										
7.3	Construcción infraestructura del relleno										
7.4	Construcción infraestructura servicio conexos										
SITIO CONSTRUIDO											
8. SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN AMBIENTAL DE OPERACIÓN											
OBTENCIÓN DE LA AAO											
9. OPERACIÓN											
9.1	Plan de operación										
9.2	Mantenimiento y control general del sitio										
9.3	Controles operacionales, registro y análisis de información										
9.4	Condiciones de seguridad ocupacional										
9.5	Plan de gestión ambiental										
FIN DE LA OPERACIÓN											
10. CLAUSURA											
10.1	Obras de clausura										
10.2	Tareas post clausura										
MONITOREO POSTCLAUSURA											

3.3 LINEAMIENTOS INICIALES

Cuando se identifica la necesidad de un nuevo sitio para un relleno sanitario y se decide comenzar el camino de búsqueda de un predio, se recomienda analizar en forma preliminar algunas cuestiones clave. Estas serán grandes condiciones o restricciones que los equipos técnicos deban satisfacer con la solución que desarrollen. Es de destacar que alguna de ellas podría ser revisada durante el desarrollo técnico.

Se recomienda analizar en forma preliminar las siguientes cuestiones clave:

- ¿Cuándo es necesario que esté operativo el nuevo relleno?
- ¿Dará servicio a solo un departamento o a más?
- ¿Cómo se integra el relleno con otras iniciativas en residuos?
- ¿Cómo se financia la construcción y operación?
- ¿Quién será responsable de la operativa?
- ¿Es posible asegurar los recursos para la operación del nuevo relleno?
- ¿Cómo se gestionará la participación de los actores de la sociedad?
- Consideración de los costos asociados a la inversión y operación del relleno.

3.3.1 ¿Cuándo es necesario que esté operativo el nuevo relleno?

La respuesta a esto está muy relacionada con la vida útil remanente del sitio de disposición final que actualmente se está utilizando, o de la urgencia que se tenga de mitigar los problemas ambientales que esté causando. El tiempo necesario para tener un relleno sanitario operativo desde que se plantea la necesidad de un nuevo relleno es por lo menos 18 a 24 meses. Se debe comenzar la búsqueda de sitio 2 años antes de que se finalice la vida útil del sitio de disposición final actual.

3.3.2 ¿Dará servicio a un solo departamento o a más?

Aquí se busca definir internamente cuál es la apertura ante la posibilidad de aceptar que residuos de otros departamentos sean dispuestos en territorio propio o a la inversa. Es necesario identificar si existen barreras o conflictos sobre este punto, por ejemplo políticas, sociales, operativas, económicas o administrativas y analizar cuáles podrían ser las formas de superarlos.

Desde el punto de vista técnico, si el relleno sirve a más un departamento o localidad, deben buscarse sitios que sean especialmente accesibles, que cumplan con las dimensiones necesarias y minimicen las distancias de transporte.

3.3.3 ¿Cómo se integra el relleno con otras iniciativas en residuos?

En este punto es necesario responder cómo se integraría e interactuaría la operación del relleno en las posibles modalidades (Ej.: operación a cargo de la Intendencia, operación tercerizada) con otras iniciativas como por ejemplo de separación en origen, compostaje o los sistemas de gestión para grandes generadores. El hecho de que existan las mismas debe ser considerado porque, entre otras, cambian las cantidades que ingresarán al relleno sanitario.

3.3.4 ¿Cómo se financia la construcción y operación?

Responder a este aspecto implica analizar y definir si la construcción será con fondos del Gobierno Departamental (GD), de otro origen del Estado, de un organismo financiador, o si serán realizadas por un privado. Esta definición inicial es importante a la hora de buscar financiación y de concebir un eventual proceso de licitación.

Es necesario encontrar una forma de pago que sea acorde a las posibilidades de el o los departamentos.

Como ejemplos se mencionan las siguientes situaciones:

- a) el GD realiza con recursos propios tanto la construcción como la operación.

- b) se prevé licitar únicamente la construcción del nuevo relleno, quedando la operación por parte del GD. La forma de financiación de la obra la definirá el propio GD.
- c) cuando se prevé que tanto la construcción como la operación sean tercerizadas se puede realizar un llamado a licitación para construcción y operación del relleno. La financiación será dada por la empresa tercerizada cobrándole al Gobierno Departamental un monto por tonelada dispuesta.

3.3.5 ¿Quién será responsable de la operativa?

Para operar con éxito un nuevo relleno, pueden ser necesarios cambios en la forma actual de operación. Es necesario definir cuál es la forma de operación que dé el mejor resultado dadas las capacidades de la Intendencia correspondiente y el contexto. Como casos extremos se trata de definir si la Intendencia está en condiciones de efectivizar los cambios necesarios para tomar bajo su cargo directo una operativa de calidad o es más efectivo que la operación la haga un tercero. Debe considerarse que existe un abanico de opciones intermedias que también deberían explorarse, como ser la tercerización de alguna actividad, por ejemplo el suministro de maquinaria para la operación del relleno.

Este análisis implica evaluar si dentro del GD se pueden identificar candidatos para encargarse del relleno, en general ingenieros, que puedan ocuparse de dirigir la operación del relleno y que cuenten con la confianza de las autoridades para otorgarles la suficiente autonomía y la administración de los recursos. De lo contrario se deberá evaluar la contratación del personal necesario.

3.3.6 ¿Es posible asegurar los recursos para la operación del nuevo relleno?

Operar un relleno durante su vida útil puede abarcar entre 3 o 4 períodos de gobierno departamental y la sostenibilidad financiera es un factor clave para el éxito de su operación.

La operación y mantenimiento en forma adecuada de los rellenos sanitarios generarían un incremento no despreciable sobre los presupuestos departamentales actuales, identificándose la necesidad de realizar un análisis integral sobre cuál sería la forma óptima de asegurar la sostenibilidad financiera de la gestión de residuos [1].

La mejora en la gestión de los residuos a través de la mejora en la disposición final, en la mayoría de los casos estudiados, implicaría un aumento, en promedio, del 40% del monto actual destinado a la gestión de los residuos. Por otro lado, la consideración de la regionalización, puede tener un impacto positivo en el presupuesto departamental, como es el caso de Mercedes, en donde la gestión de residuos se abarataría aproximadamente en un 8% con relación al presupuesto actual [1]².

Se debe buscar y confirmar anualmente la aceptación del presupuesto departamental de los gastos previstos para operar el relleno. Esto debería asegurar el funcionamiento continuo y satisfactorio del nuevo relleno.

3.3.7 ¿Cómo se manejará la participación de los actores de la sociedad?

Emprender un proyecto de un nuevo relleno sanitario siempre tiene asociado el desafío de lograr la aceptación por parte de la población. Para aumentar las posibilidades de éxito es necesario que en cada caso se estudie la estrategia a desarrollar para realizar la comunicación del nuevo sitio y así lograr su aceptación por parte de la población.

Si bien el anuncio en las etapas iniciales de la búsqueda de sitio puede tener la desventaja del alza del precio de los posibles predios, se recomienda involucrar a la sociedad civil desde las etapas iniciales. El proceso de búsqueda de sitio puede ser usado para educar a la población sobre las ventajas y desventajas asociadas a la existencia de un relleno sanitario, además de mostrar a la población el esfuerzo y grado de conocimiento técnico asociado a la decisión.

² Este cálculo no considera la eventual necesidad de una estación de transferencia.

En cualquier caso, una vez tomada la decisión de construir un nuevo relleno, es conveniente que la estrategia específica de participación pública, sea elaborada por un especialista en el tema. La misma debe contemplar en qué etapa del proyecto se comunicará, en qué instancias se prevé dar participación a la población y las modalidades de comunicación que se desarrollarán.

3.3.8 Costos asociados a un relleno sanitario

A modo de referencia, se presenta la **Tabla 3-2** que muestra el costo de operación y mantenimiento (O&M) de la disposición final (USD/ton) para distintos escenarios de funcionamiento para varias localidades del país disponiendo residuos en forma individual.

También a modo de referencia, se presenta la **Tabla 3-3** con costos de O&M de la disposición final (USD/ton) para casos en que se asocian localidades y se realiza una regionalización de la disposición final.

En el primer caso para la ciudad de Durazno el costo estimado para el funcionamiento de un relleno mecanizado en dos turnos de trabajo es de 51,6 USD/ton, mientras que bajo el mismo escenario de funcionamiento se presenta el caso de Durazno asociado con el departamento de Flores con un costo de disposición final es de 28,9 USD/ton. Es evidente la conveniencia de asociarse con otros departamentos para el nuevo emprendimiento y aprovechar las economías de escala.

Tabla 3-2: Costos (U\$S/ton) de O&M de rellenos sanitarios para distintas localidades [1]

Localidad	Departamento	Escenario		
		Dos turnos de func. y op. mecanizado	Un turno de func. y op. mecanizado	Un turno de func. y op. semi-mecanizado
Artigas	Artigas	27,7	23,3	a
Bella Unión		57,2	b	31,2
Melo	Cerro Largo	31,0	26,2	a
Colonia	Colonia	36,3	30,4	a
Durazno	Durazno	51,6		c
Trinidad	Flores	59,3		c
Minas	Lavalleja	33,8	28,3	a
Paysandú	Paysandú	21,4		a
Fray Bentos	Río Negro	65,9		c
Rivera	Rivera	21,7		a
Rocha	Rocha	75,5		a
Salto	Salto	20,6		a
Mercedes	Soriano	41,6		c
Tacuarembó	Tacuarembó	31,9	b	26,7
Treinta y Tres	Treinta y Tres	78,0	b	32,2

- a- La escala del relleno sanitario no permite una configuración semi-mecanizada
- b- La escala del relleno sanitario permite una configuración semi-mecanizada
- c- La escala del relleno y la ubicación geográfica permite la realización de un relleno regional

Tabla 3-3: Costo (U\$S/ton) de O&M de rellenos sanitarios en los casos de regionalización (no incluye costos de transferencia) [1]

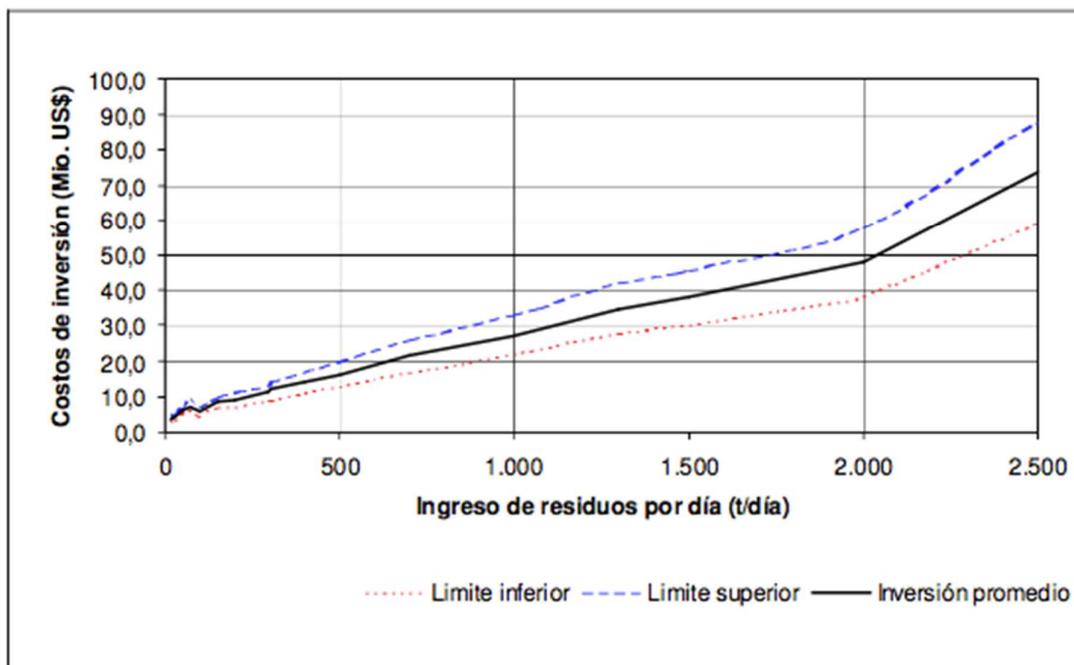
Regional	Departamento	Costo DF (USD/ton) ¹⁰⁸
Durazno/Trinidad	Flores	28,9
	Durazno	
Mercedes / Fray Bentos	Soriano	27,6
	Río Negro	

¹⁰⁸ Contempla dos turnos de trabajo

Además de la ventaja de la economía de escala de asociarse para la disposición, la minimización del número de sitios de disposición final reduce la cantidad de sitios con potencial de ser impactados por la disposición final de residuos, así como la posibilidad de conflictos sociales.

Los costos de inversión se componen principalmente por los costos de construcción y costos de equipamiento y maquinaria. La **Figura 3-1** presenta valores de referencia de la inversión de acuerdo a la cantidad que ingresa diariamente al relleno, para una vida útil de 20 años.

Figura 3-1: Costos de inversión para rellenos sanitarios [2]



4 SELECCIÓN DE SITIOS Y CRITERIOS DE LOCALIZACIÓN

4.1 OBJETIVO

La selección del sitio donde se emplazará un relleno sanitario es parte medular de un proyecto de gestión integral de residuos sólidos, ya que, cuando ella se realiza a partir de una correcta planificación y evaluación previa de posibles predios, permite optimizar costos (de transporte, de construcción, operativos) y mitigar impactos ambientales negativos.

El objetivo de este capítulo es proporcionar criterios de localización, los cuales comprenden criterios de exclusión y de aptitud para la selección de sitios y una metodología de aplicación.

En una primera etapa, a partir del trabajo de gabinete se deben aplicar criterios de exclusión para identificar zonas potenciales. La posterior aplicación de criterios de aptitud permite elaborar una lista larga de posibles sitios (más de 5 sitios). Con esa preselección de sitios se deben realizar visitas de campo para obtener una lista corta (menos de 5 sitios) y validar la preselección.

Luego se realiza una conceptualización del proyecto de relleno y se comparan en forma preliminar los costos constructivos y operativos de esa lista corta, para identificar los costos diferenciales que presenta un sitio y otro. Para aquel sitio que presenta menores costos se realizan estudios geológicos, hidrogeológicos y topográficos.

Con los resultados de los estudios se validan y corrigen los costos estimados y se llega a la propuesta de sitio, brindando las bases para la toma de decisión por parte de las autoridades respecto a la selección del sitio. En caso de que los estudios realizados invaliden el sitio por algún aspecto que difiere de lo supuesto, se realizarán los mencionados estudios en el segundo sitio de acuerdo a la preselección.

La metodología planteada contempla las etapas desde que se identifica la necesidad de un nuevo relleno sanitario hasta la selección de un sitio específico para su emplazamiento considerando tres componentes principales:

- Lineamientos iniciales (considerados en el capítulo anterior)
- Cálculo del área requerida
- Aplicación de criterios de selección

4.2 SÍNTESIS DEL PROCESO DE SELECCIÓN DE SITIO

La **Figura 4-1** presenta en forma esquemática una síntesis del proceso de selección de sitio, planteando conjuntamente todas las definiciones a realizar desde que se identifica la necesidad de un nuevo sitio para un relleno sanitario hasta que se selecciona un predio específico.

Es imprescindible documentar todas las instancias transitadas desde que se identifica la necesidad de un nuevo relleno, los argumentos políticos y técnicos con que se realizaron los lineamientos iniciales, así como los cálculos para definir el área requerida y, en especial, toda la información generada en los 6 pasos necesarios para llegar a la obtención de un predio específico para el nuevo relleno sanitario.

Figura 4-1: Proceso de selección de sitio



4.3 CÁLCULO DEL ÁREA REQUERIDA

A partir de la definición de la población a servir con el nuevo relleno (ya sea involucrando a uno o más departamentos), debe calcularse el volumen total anual de residuos, y a continuación una estimación de la capacidad y área requerida del sitio para servir la vida útil estimada.

Para calcular el área requerida para el emplazamiento se debe:

1. Definir el tipo de residuos a disponer;
2. Definir la vida útil del proyecto;
3. Calcular el total de residuos a disponer;
4. Estimar la densidad de los residuos una vez compactados;
5. Calcular el volumen ocupado por el material de cobertura diaria;
6. Calcular los requerimientos adicionales de área para la infraestructura auxiliar.

A continuación se detallan cada una de las variables a considerar, lo que permite al lector una eventual re-estimación si alguno de los parámetros de base se modifica.

4.3.1 Residuos a disponer en el relleno

Como paso previo a cualquier cálculo es necesario definir con claridad qué tipo de residuos serán dispuestos en el relleno que se diseñará. Esto equivale a contestar si se incluirán:

- a) Residuos domiciliarios
- b) Residuos de limpieza de espacios públicos
- c) Residuos de actividades productivas, comerciales y de servicios
- d) Residuos sanitarios tratados
- e) Residuos de obras y construcción

4.3.2 Vida útil

La vida útil del proyecto refiere a los años durante los cuales se utilizará el relleno y sobre los que se calculará la amortización del equipamiento asociado. Un buen criterio puede ser dimensionar para 20 años lo cual implica que su operación trasciende varios períodos de gobierno.

4.3.3 Total de residuos a disponer

La cantidad de residuos a disponer en cada año (medida en kg) se calcula como el producto de la población a servir (Pob), por la tasa de generación (tasa en $\frac{\text{kg}}{\text{hab} \cdot \text{día}}$), por $365 \frac{\text{día}}{\text{año}}$. El total de residuos a disponer (TR) es la suma de dicho producto para cada año (i) a lo largo de la vida útil del proyecto.

$$TR (kg) = \sum_{i=1}^{i=\text{vida útil}} (\text{Pob} * \text{tasa} * 365)_i$$

Para realizar dicho cálculo es necesario proyectar tanto el crecimiento de la población como la variación de la tasa de generación de residuos para cada año, desde el inicio del proyecto hasta los años de vida útil.³ Se debe tener claramente delimitada la zona geográfica a la que servirá el relleno sanitario para los distintos años de su vida útil, con el fin de calcular la población a servir.

A modo de ejemplo, para un cálculo preliminar tomando una vida útil de 20 años y una tasa de generación constante de 0.8 (kg/hab./día)⁴, la fórmula de cálculo se puede simplificar a:

$$TR (kg) = \text{Pob} * 0.8 * 365 * 20$$

4.3.4 Densidad de residuos compactados

Con el objetivo de optimizar el volumen útil en el relleno, los residuos dispuestos deben ser compactados a través del uso de maquinaria específica. Cuanto mayor sea el grado de compactación se tendrá un mayor aprovechamiento del sitio. En función de las toneladas diarias que ingresen al sitio se tendrá un relleno mecanizado donde la densidad de residuos compactados varía entre 600-1000 kg/m³ o un relleno semi-mecanizado con densidad entre 300-600 kg/m³.

4.3.5 Volumen ocupado por la cobertura diaria

En un relleno correctamente operado, los residuos dispuestos deben cubrirse diariamente con una capa de material, denominado cobertura diaria. Se estima que dicha cobertura adiciona en un 20-30% el volumen de residuos depositados

4.3.6 Área ocupada por infraestructura auxiliar

Todo relleno sanitario debe contar con infraestructura auxiliar a las celdas, incluyendo entre otros, caminería de acceso, control de ingreso, vigilancia y cerco perimetral, vestuarios, zona de amortiguamiento y planta de tratamiento de lixiviados.

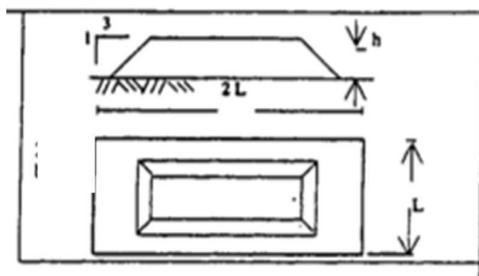
Se recomienda considerar al menos un 40% del total del área calculada para la disposición de los residuos, de forma de cubrir las necesidades de infraestructura auxiliar [1].

A continuación se incluye una estimación preliminar del área necesaria de acuerdo a distintos tamaños de localidades. La **Figura 4-2** esboza una propuesta de geometría de relleno que sirve para los cálculos utilizados posteriormente.

³ Información poblacional y proyecciones de crecimiento para cada localidad disponibles en www.ine.gub.uy

⁴ En la **Tabla 9-3** se presentan tasas de generación para distintos departamentos.

Figura 4-2: Geometría del relleno utilizada para el cálculo del área requerida



La **Tabla 4-1** presenta valores de área requerida de acuerdo a la población servida, considerando una vida útil de 20 años; tasa de generación constante de 0,8 kg/hab./día; densidad de compactación de 800 kg/m³, altura de celdas 10m a 40m. Además se considera un 30% adicional de volumen ocupado por tierra de cobertura y 40% de área para infraestructura auxiliar.

Tabla 4-1: Área necesaria de acuerdo al tamaño de población servida

Población	Total residuos (ton)	h (m)	L (m)	Área (ha)
50.000	292.000	10	160	9
75.000	438.000	10	190	12
100.000	584.000	10	220	15
200.000	1.168.000	12	280	24
300.000	1.752.000	12	350	37
500.000	2.920.000	12	430	55
1.000.000	5.840.000	20	500	74
1.500.000	8.760.000	20	600	106
1.500.000	8.760.000	40	460	63

Por ejemplo, para una población de 50.000 habitantes, una estimación preliminar sugiere que se generan 292.000 toneladas de residuos a lo largo de 20 años de vida útil de proyecto. Se requiere para este caso un área mínima de 9 hectáreas para el emplazamiento del sitio.

Una vez que se ha estimado el área requerida por el nuevo relleno sanitario se procede a la selección del sitio mediante la aplicación de criterios de localización.

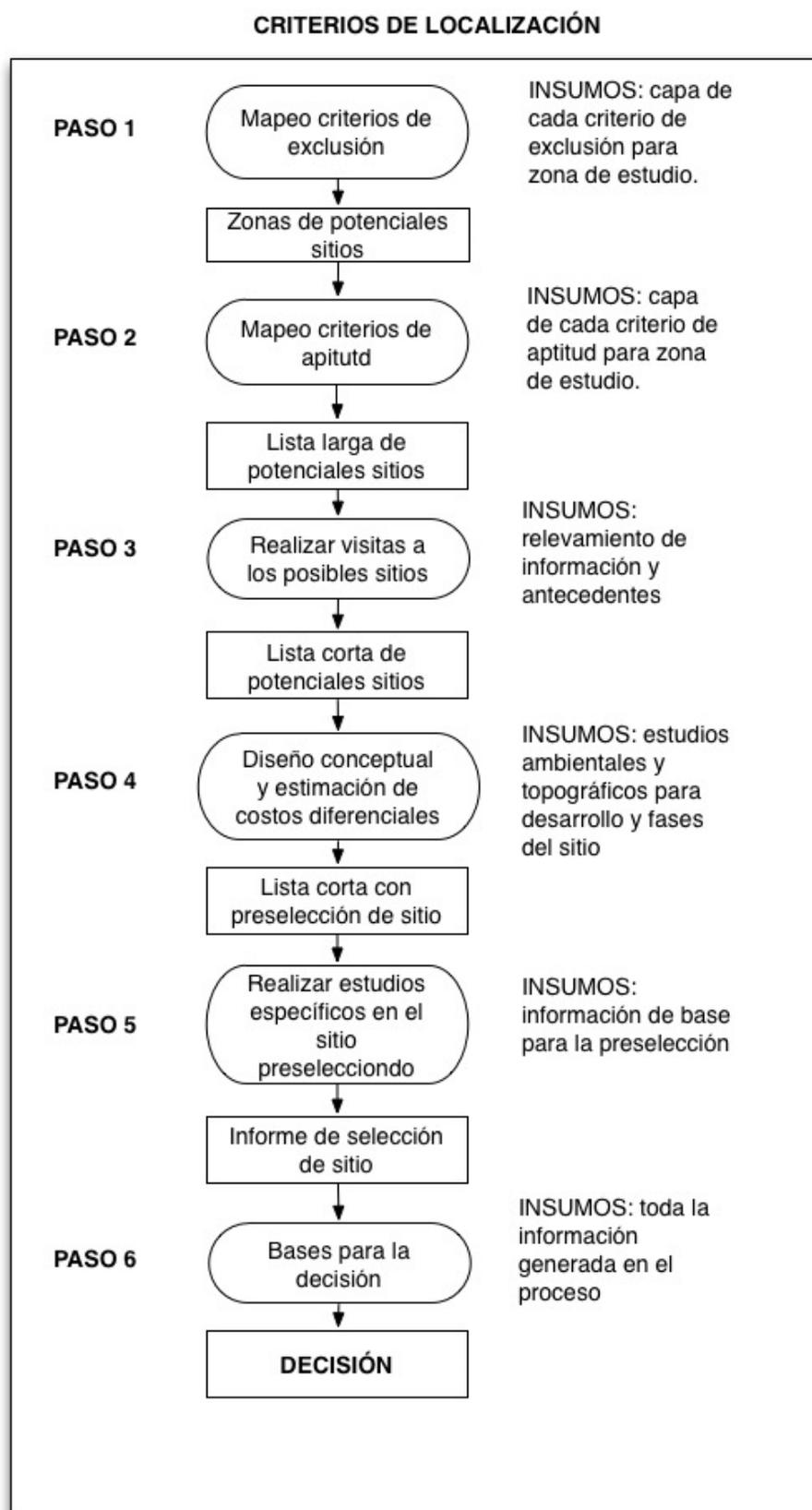
En el Anexo 9.2 se presentan los métodos de llenado de rellenos sanitarios comúnmente utilizados.

4.4 CRITERIOS DE LOCALIZACIÓN

En esta sección se detallan **6 pasos** para la selección del predio para el nuevo relleno sanitario, una vez ya definida el área requerida. En la **Figura 4-3** se resumen los 6 pasos a seguir y se describen los insumos de información necesaria para respaldar las decisiones.

El **paso 1** corresponde al **mapeo de los criterios de exclusión**; el **paso 2** corresponde al **mapeo de los criterios de aptitud**; el **paso 3** corresponde a las **visitas de campo** a realizar, el **paso 4** prevé realizar un **diseño conceptual y estimación preliminar de costos**, el **paso 5** detalla los **estudios de campo** (topografía, medioambiente, hidrogeología, hidrología y geología) que proporcionan información para ajustar las estimaciones de costos y permiten confirmar el sitio preseleccionado para realizar una propuesta de selección de sitio con el correspondiente **informe de selección de sitio**. El **paso 6** prevé la toma de decisión por parte de las autoridades en base a la recomendación de sitio.

Figura 4-3: Pasos para la selección del sitio (adaptado de [1])



4.4.1 Paso 1: Mapear los criterios de exclusión.

Los criterios de exclusión son aspectos a considerar que, como el nombre lo indica, invalidan dentro de una zona la identificación de posibles áreas de emplazamiento de rellenos sanitarios.

Esta guía considera los criterios de exclusión bajo cuatro aspectos principales:

1. Condiciones naturales
2. Uso del suelo
3. Aceptación pública
4. Seguridad

Para mapear cada uno de estos criterios se recomienda el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica, donde cada capa corresponde a cada uno de los criterios. Superponiendo todas las capas se obtienen las zonas “libres”, que no fueron excluidas por ningún criterio. La búsqueda de los predios se hará dentro de estas zonas “libres.”

La **Tabla 4-2** presenta los criterios de exclusión recomendados por esta Guía para la selección de sitios en Uruguay.⁵

Tabla 4-2: Criterios de exclusión recomendados

Criterios de exclusión	
Condiciones naturales	Predios ubicados en áreas inundables con un período de retorno de 100 años
	Predios ubicados sobre área de recarga de acuíferos (*)
	Predios ubicados a una distancia menor a 5km a fuentes superficiales de suministro de agua
	Predios ubicados a una distancia menor a 300m de distancia a cuerpos de agua superficial (cursos permanentes)
	Predios ubicados sobre discontinuidades geológicas y de alta permeabilidad
	Predios donde la distancia al nivel freático máximo registrado sea menor a 2m
	Predios ubicados a una distancias menor a 5km a pozos para suministro de agua para poblaciones
	Predios ubicados en humedales, áreas de reservas ecológica, áreas protegidas, áreas de interés arqueológico
Uso del suelo	Predios con área menor a la requerida
Aceptación pública	Predios ubicados a una distancia menor a 4km a zonas urbanas
Seguridad	Predios ubicados a una distancia menor a 3km del límite de predio de un aeropuerto o menor a 1.5km de un aeródromo

(*) de no existir información antecedente, esta característica surgirá luego de realizar visitas y estudios de los posibles sitios y no se mapeará en una primera instancia.

Una vez finalizado el mapeo de los criterios de exclusión, se identifican en el mapa posibles zonas. Es en estas zonas donde se aplican criterios de aptitud, para poder establecer un ranking de preferencias en cuanto a la localización.

⁵ Los mismos surgen a partir de la revisión de los criterios de exclusión utilizados a nivel internacional por el Banco Mundial [1], la EPA [2] y de la revisión de experiencias locales en aplicación de criterios de exclusión ([4] Y [5]), junto con la propuesta de criterios de exclusión ([3]) generada en el proceso de elaboración del Dec. N°182/013 (PTR).

4.4.2 Paso 2: Mapear los criterios de aptitud para comparar sitios.

Los criterios de aptitud permiten profundizar en el estudio de los predios identificados. Los criterios se agrupan en los mismos cuatro aspectos ya definidos para los criterios de exclusión y agregan un quinto aspecto referido a la accesibilidad. Los criterios de aptitud consideran otras características deseables y permiten comparar diferentes candidatos.

Los criterios que se describen a continuación se evalúan dando puntaje a cada sitio de acuerdo a la **Tabla 4-5**.

4.4.2.1 Aptitud por accesibilidad

Se debe buscar que los predios a considerar sean accesibles a través de vías existentes, así se minimiza el costo de apertura de caminos nuevos, y se minimiza la posible molestia a vecinos. Se recomienda:

- Distancia máxima a rutas nacionales, rutas secundarias o caminos de acceso existentes menor a 5km.

Uruguay cuenta con una muy buena red de rutas y caminos, si bien a nivel internacional esta es una restricción importante a tener en cuenta, dada la topografía del país muy pocas zonas quedan condicionadas por esta razón.

Otro criterio deseable es que los predios cumplan con:

- Minimizar la distancia entre el sitio y el centro de masa de la generación

Para el cálculo del centro de masa de generación (x_G , y_G) se deben considerar las coordenadas (x_i , y_i) y la población de cada localidad a servir (pob_i) y se realiza el siguiente cálculo:

$$x_G = \frac{\sum_i pob_i * x_i}{\sum pob_i} \qquad y_G = \frac{\sum_i pob_i * y_i}{\sum pob_i}$$

Como ejemplo de cálculo se toman las coordenadas de las localidades presentadas en la **Tabla 4-3**, el centro de masa de generación es:

$$x_G = 552.605 \qquad y_G = 6.275.406$$

Tabla 4-3: Localidades cercanas

Localidad	Población (2011)	X (UTM)	Pob*X	Y (UTM)	Pob*Y
Durazno	34.368	544.211	18.703.443.648	6.306.460	216.740.417.280
Sarandí del Yí	7.176	627.227	4.500.980.952	6.309.560	45.277.402.560
Trinidad	21.429	509.644	10.921.161.276	6.291.171	134.813.503.359
Florida	33.639	572.462	19.257.049.218	6.226.486	209.452.762.554
Sarandí Grande	613	561.857	344.418.341	6.267.984	3.842.274.192
Población total	97.225	suma Pob*X	53.727.053.435	suma Pob*Y	610.126.359.945
		XG	552.605	YG	6.275.406

A la hora de comparar posibles predios candidatos, aquel que se encuentre más cerca del centro de masa de generación será considerado como el de mayor aptitud.

4.4.2.2 *Aptitud por condiciones naturales*

Las condiciones naturales del predio son evaluadas a través de las siguientes características:

- a) Material geológico con conductividad hidráulica (K) menor a 1×10^{-5} cm/s: refiere a las características del material in situ. Luego de ser trabajado y compactado a humedad óptima es de esperar una K menor a 1×10^{-7} cm/s.
- b) Distancia del piso de la celda al nivel freático mínima de 2m: de acuerdo al tipo de relleno seleccionado (sea de área o de celda excavada, ver Anexo 9.2) esta distancia refiere a la distancia desde la base del paquete impermeable hasta el nivel freático máximo registrado.
- c) Espesor de la capa impermeable mayor a 1m: refiere al espesor de la capa del material geológico con K menor a 1×10^{-5} cm/s.
- d) Pendientes del terreno moderadas, menores a 5%: los terrenos planos facilitan la construcción del relleno y la nivelación del terreno con una leve pendiente permite evacuar los lixiviados por gravedad.
- e) Cuenca de aporte al curso de agua más cercano suficiente para recibir la descarga del lixiviado: refiere a la cuenca de aporte con punto de cierre definido por el punto de vertido del lixiviado tratado⁶.
- f) Disponibilidad de materiales de cobertura (drenes, caminería, fundación): verificar que los mismos pueda ser extraído del sitio seleccionado o de un sitio de préstamo cercano.
- g) Vientos predominantes en dirección opuesta a vecinos cercanos: refiere a analizar la dirección de viento predominante en el sitio (evaluado a través de la rosa de los vientos para 5 años) y verificar que el viento más frecuente no esté en dirección a los vecinos del predio.

4.4.2.3 *Aptitud por uso del suelo*

Respecto al uso del suelo, se deberán considerar las siguientes características como deseables para la identificación de un sitio:

- a) Predios pertenecientes a un solo propietario: para minimizar las gestiones de compra y los posibles conflictos se recomienda dar preferencia a predios pertenecientes a un solo propietario.
- b) Preferir predios donde no existan o no sean atravesados por ningún servicio público como ser líneas de alta tensión, oleoductos, gasoductos, tuberías de agua o saneamiento, red de datos, que puedan limitar la actividad del relleno.
- c) Cercanía a una planta de tratamiento de efluentes cloacales: los sistemas de tratamiento de lixiviados no difieren de los utilizados para el tratamiento de efluentes cloacales. El lixiviado generado por una población representa menos del 5% en carga que el efluente cloacal generado por la misma población. Se recomienda contemplar la alternativa de enviar el lixiviado a tratar en una planta de tratamiento de efluentes cloacales cercana.

Asimismo, deben considerarse las siguientes características como no deseables:

- a) Alta productividad en el uso del suelo en los alrededores del predio: predio con alta producción agrícola en los cercanías del predio puede levantar rechazos de la población y presentar elevados costos de adquisición.
- b) Alto índice de productividad CONEAT: este índice refiere a áreas homogéneas, definidas por su capacidad productiva en términos de carne bovina, ovina y lana en pie. Esta capacidad se expresa por un índice relativo a la capacidad productiva media del país.
- c) Se debe evitar la presencia de escuelas, edificios públicos, sitios históricos, se sugiere alejarse de para evitar interferir en estas actividades.

⁶ Se debe respetar lo planteado en el Decreto N°253/79 y modificativos (y su propuesta de actualización consolidada de COTAMA) sobre área mínima de cuenca para realizar vertido a cursos de agua para los casos con carga vertida superior a 6kgDBO₅/día.

4.4.2.4 Aptitud por aceptación pública

Un aspecto importante en todo el proceso de selección de sitio es la reacción de la sociedad civil a la posible ubicación. Es importante contar con la aceptación pública desde las etapas iniciales; para ello es recomendable realizar la presentación del proyecto a la población cercana al sitio.

Para aumentar las posibilidades de aceptación pública se deben buscar

- Predios en los que no exista interferencia en la cuenca visual con recursos culturales, paisajísticos, centros de interés social.

4.4.2.5 Asignación de puntajes de aptitud

A la hora de comparar sitios se debe asignar un puntaje de cumplimiento a cada criterio. La **Tabla 4-4** presenta el puntaje a asignar según el grado de cumplimiento.

Tabla 4-4: Puntuación según cumplimiento de cada criterio

Criterio de aptitud	Puntuación (B) según grado de cumplimiento				
	Deficiente = 0	Regular = 25	Bueno = 50	Muy bueno = 75	Excelente = 100
Distancia a una ruta principal o secundaria (km)	>5	3 a 5	2 a 3	0 a 2	0
Distancia al centro de masa (CM) de generación	Sitio mas alejado al CM	Puntaje ponderado según distancia al CM de los sitios comparados			Sitio mas cercano al CM
Conductividad hidráulica del material geológico - K(cm/s)	$>1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-6} < K < 1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-7} < K < 1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-8} < K < 1 \times 10^{-7}$	$K < 1 \times 10^{-8}$
Distancia al nivel freático (m)	<2	2 a 4	4 a 7	7 a 10	>10
Espesor de la capa impermeable (m)	<1	1 a 3	3 a 6	6 a 10	>10
Pendiente del terreno (menores a 5%)	>5	4 a 5	3 a 4	2 a 3	<2
Cuenca de aporte al curso de agua cercano suficiente para diluir el vertido del lixiviado (km ²)	Sitio con menor cuenca de aporte	Puntaje ponderado según área de la cuenca de aporte de los sitio comparados			Sitio con mayor cuenca de aporte
Distancia a la disponibilidad de materiales de cobertura y otros (drenes, caminería, fundación) (km)	>5	3 a 5	2 a 3	1 a 2	En el predio
Direcciones de viento hacia vecinos cercanos - VC (% de tiempo)	80 a 100%	60 a 80%	40 a 60%	20 a 40%	0 a 20%
Predios pertenecientes a un solo propietario	NO				SI

DOCUMENTO BASE PARA LA ELABORACIÓN DE
Guía y pautas técnicas de rellenos sanitarios de residuos sólidos

Criterio de aptitud	Puntuación (B) según grado de cumplimiento				
	Deficiente = 0	Regular = 25	Bueno = 50	Muy bueno = 75	Excelente = 100
Distancia a servicios y/o conducciones (líneas de alta tensión, gasoductos, oleoductos, red de agua/saneamiento, red de datos) (km)	1 a 3	3 a 5	5 a 7	7 a 10	>10
Distancia a una planta de tratamiento de cloacales (km)	No existe cercana	15	10 a 15	5 a 10	<5
Existencia de predios con alta productividad agrícola en el entorno (Nº predios).	Más de 5 (Muchos)	3 a 5 (Varios)	2 o 3 (Algunos)	1 o 2 (Unos pocos)	Ninguno
Productividad de la tierra medido a través de CONEAT	Mayor índice CONEAT	Puntaje ponderado según índice CONEAT de los sitios comparados			Menor índice CONEAT
Distancia a escuelas, edificios públicos, sitios históricos (km)	1 a 3	3 a 5	5 a 7	7 a 10	>10
Interferencia con la cuenca visual de recursos culturales o paisajísticos	SI				NO

Luego de asignar una puntuación (B) para cada criterio según el grado de cumplimiento, se debe multiplicar la puntuación (B) por el peso relativo definido para cada criterio (A) para tener el puntaje parcial de cada criterio. Luego se realiza la suma de todos los puntajes parciales para llegar al puntaje total de un sitio.

Para comparar un sitio con otro se comparan los puntajes totales, el sitio con mayor puntaje será el más apto.

La **Tabla 4-5** muestra este cálculo, para un supuesto sitio al cual se le han asignado puntajes (B) a modo de ejemplo.

Tabla 4-5: Cálculo del puntaje según criterios de aptitud para un sitio (adaptado de [6])

Criterios de aptitud		Peso relativo (A)	Puntuación según Tabla 3-4 (B)	Puntaje parcial (A*B)
Accesibilidad (20%)	Predios ubicados a una distancia menor a 5km de una ruta principal o secundaria	10%	25	2.5
	Distancia al centro de masa de generación	10%	50	5
Condiciones naturales (50%)	Permeabilidad del material geológico	13%	50	6.5
	Distancia al nivel freático	6%	75	4.5
	Espesor de la capa impermeable	6%	50	3
	Pendiente del terreno	5%	25	1.25
	Cuenca de aporte al curso de agua cercano suficiente para soportar el vertido del lixiviado	5%	50	2.5
	Disponibilidad de materiales de cobertura (drenes, caminería, fundación)	10%	75	7.5
	Direcciones de viento predominante hacia VC	5%	25	1.25
Uso del suelo (25%)	Predios pertenecientes a un solo propietario	4%	50	2
	Distancia a servicios y/o conducciones (líneas de alta tensión, gasoductos, oleoductos, red de agua/saneamiento, red de datos)	2%	25	0.5
	Distancia a una planta de tratamiento de cloacales	10%	50	5
	Productividad agroindustrial del entorno	2%	50	1
	Productividad de la tierra medido a través de CONEAT	2%	75	1.5
	Distancia a escuelas, edificios públicos, sitios históricos	5%	50	2.5
Aceptación pública (5%)	Interferencia con la cuenca visual de recursos culturales o paisajísticos, centros de interés social	5%	75	3.75
PUNTAJE TOTAL				50

Se recomienda descartar aquellos sitios que no presentan un puntaje total mínimo del 40 puntos.

Al finalizar la aplicación de los criterios de aptitud se contará con una lista priorizada de sitios. Para los sitios con mayor puntaje se realizan las visitas de campo para una estimación preliminar de costos. A fin de organizar el trabajo de campo se sugiere iniciar las visitas en los 5 sitios con mayor puntaje.

4.4.3 Paso 3: Realizar visitas técnicas a los sitios

La visita técnica a los sitios permite confirmar si los sitios son viables, a través de la evaluación de la accesibilidad a los mismos, el estado de los caminos, así como estudiar las actividades desarrolladas en los alrededores.

Además permite conocer de primera mano los actores locales, los sitios de interés de la población local y características particulares del uso del suelo del entorno.

En síntesis, la descripción del entorno comprende:

- a) entorno social y demográfico
- b) referentes locales
- c) usos del suelo
- d) accesibilidad

Las evaluaciones realizadas in situ por los responsables de la visita permitirán la identificación de algún aspecto o punto de conflicto que no fue considerado por los criterios de exclusión o de aptitud. Esto se reflejará en un informe de hallazgos de la visita donde se califica a cada sitio como preseleccionado o descartado.

Como resultado de la visitas de campo se clasifican los sitios visitados en PRESELECCIONADO o DESCARTADO.

4.4.4 Paso 4: Estimación de costos diferenciales

Se elabora un diseño conceptual para la implantación del relleno sanitario y se realiza una estimación de costos. Se evalúan costos de construcción, operación y cierre.

Para cada uno de los sitios preseleccionados, se identifican los aspectos que generan costos diferenciales entre un sitio y otro. Por ejemplo, el transporte de residuos hasta el sitio, disponibilidad de material de préstamo, necesidades de la caminería de acceso, acceso a servicios básicos, entre otros. En base a ello se determinan la diferencia de costos en cada opción. A su vez, se estiman los costos totales de los proyectos, con el objetivo de conocer el porcentaje del total de costos que representan estas diferencias. Se sugiere considerar especialmente el impacto del transporte de los residuos hasta el sitio preseleccionado.

En función de los costos planteados, se elige el mejor candidato y se comienzan los estudios básicos.

4.4.5 Paso 5: Realizar estudios básicos en el sitio candidato

Estos estudios se realizan en el sitio seleccionado y permiten confirmar los supuestos a la vez que aportan información necesaria para el posterior diseño y elaboración del proyecto ejecutivo.

Dichos estudios comprenden:

1. **Estudio geológico**, el cual debe contener al menos la siguiente información:
 - a. Formación(es) geológicas existentes con sus principales características (conductividad hidráulica, excavabilidad, índice de plasticidad) a escala 1/200.000.

- b. Ubicación de los cateos realizados.
 - c. Planos con cortes, espesores y profundidades de las distintas formaciones geológicas.
2. **Estudio hidrogeológico**, el cual debe contener al menos la siguiente información:
- a. Presencia o no de agua subterránea.
 - d. Sentidos de flujo del agua subterránea.
 - e. Mapa con niveles piezométricos.
 - f. Tipo de acuífero.
3. **Relevamiento topográfico**, el cual debe contener al menos la siguiente información:
- a. Curvas de nivel cada 1m en todo el predio.

Las estimaciones realizadas en el paso anterior y los resultados de estos estudios básicos se deben recoger en el informe de selección de sitio. El mismo es un documento que recoge el camino recorrido y la información generada para llegar a la recomendación del sitio seleccionado.

Dicho informe debe demostrar que el proyecto es viable en las siguientes áreas:

- a) Física y medioambiental (accesibilidad, hidrogeológicas, topografía)
- b) Técnica (criterios utilizados)
- c) Económica (estimación de costos)
- d) Social y cultural (aceptación pública)

Una vez realizado el informe de selección de sitio, se tiene toda la información necesaria para la toma de decisión por parte de las autoridades respecto al sitio que será elegido para implantar el relleno sanitario.

En caso de que los resultados de los estudios básicos difieran sustancialmente de los supuestos que llevaron a la preselección del sitio, entonces se optará por otro de los sitios preseleccionados y se realizarán los estudios básicos al mismo.

4.4.6 Paso 6: Decisión por parte de autoridades

Una vez realizado el informe de selección de sitio, se tiene toda la información necesaria para la toma de decisión respecto al sitio que será elegido para implantar el relleno sanitario.

En base a esta información pueden corregirse o reafirmarse los lineamientos iniciales (desarrollados en el capítulo 3) para así comenzar con el diseño del relleno sanitario y llegar a un proyecto ejecutivo para su construcción.

5 DISEÑO DEL RELLENO SANITARIO

5.1 OBJETIVO

Este capítulo está dirigido a técnicos que participen en el diseño o evalúen proyectos de rellenos sanitarios. Abarca las infraestructuras y medidas organizativas necesarias, estableciendo el conjunto de especificaciones para las mismas, así como establece las necesidades de los estudios de información base.

El diseño conceptual de un relleno sanitario es una etapa clave en el proyecto. Los aspectos e impactos ambientales generados en la construcción, operación y clausura, deben ser considerados y evaluados con un enfoque técnico profundo, de forma de minimizar la afectación del entorno.

Dicho diseño depende de la ubicación geográfica del emplazamiento, de la geología, hidrogeología e hidrología del sitio, así como de los potenciales aspectos e impactos ambientales identificados, entre otros.

5.2 CONTENIDOS DEL PROYECTO DE RELLENO SANITARIO

Un relleno sanitario es un sitio para la disposición final de residuos sólidos, donde se utilizan principios de ingeniería para confinar los residuos en un área lo más pequeña posible, compactando los residuos y cubriéndolos diariamente con una capa de tierra. El mismo dispone además de un sistema de control de gases y lixiviado para evitar los potenciales daños al ambiente.

La planificación del relleno sanitario involucra definir tanto aspectos de ingeniería como organizativos. La infraestructura abarca la directamente utilizada en la disposición final, así como la infraestructura auxiliar y de servicios.

A continuación se presenta un listado de los contenidos mínimos de cada componente que se debe considerar en un proyecto de relleno sanitario:

INFORMACIÓN DE BASE DEL SITIO

1. Características de los residuos a disponer
2. Cantidad de residuos a disponer
3. Descripción del entorno
4. Estudio geológico
5. Estudio hidrogeológico
6. Estudio hidrológico
7. Relevamiento topográfico
8. Recopilación de datos meteorológicos

DEFINICIONES Y CÁLCULOS BÁSICOS

1. Criterios de admisión
2. Residuos no admisibles
3. Características de los residuos a disponer
4. Estimación de la cantidad de residuos a disponer
5. Método de operación
6. Estaciones de transferencia

COMPONENTES DEL RELLENO SANITARIO

1. Plan de llenado
2. Previsión de personal
3. Maquinaria necesaria para la operación del relleno
4. Especificaciones para la impermeabilización de base
5. Gestión del lixiviado
6. Especificaciones para los sistemas de tratamiento de lixiviados y disposición final

7. Gestión de biogás

INFRAESTRUCTURA CONEXA

1. Acceso al predio
2. Cartelería indicativa
3. Sistema de registro
4. Caminería interna
5. Barrera vegetal y zonas de amortiguamiento
6. Oficinas y vestuarios del personal
7. Taller mecánico
8. Almacenamiento de combustible
9. Instalación de combate de incendio
10. Iluminación

INFRAESTRUCTURA DE CONTROL AMBIENTAL

1. Control de aguas subterráneas
2. Control de aguas superficiales
3. Control de la descarga del lixiviado tratado
4. Control de gases, olores, vectores, voladuras

5.3 INFORMACIÓN DE BASE DEL SITIO

Esta sección explicita la información de base necesaria para realizar el diseño del relleno sanitario y la utilidad de cada uno de los aspectos estudiados.

Parte de la información de base es generada en los estudios específicos a realizar para definir la localización de un relleno sanitario (ver capítulo 4) y luego se complementa con otra información previo a comenzar el diseño propiamente dicho.

Los aspectos mínimos a contemplar en la información de base son:

- Descripción del entorno
- Estudio geológico
- Estudio hidrogeológico
- Estudio hidrológico
- Relevamiento topográfico
- Recopilación de información meteorológica

5.3.1 Descripción del entorno

En la sección 4.4.3 se realizó la descripción del entorno, como resultado se tiene información de la existencia o no de viviendas en el entorno a considerar en la orientación del relleno, la necesidad de nuevos caminos o reforzar las vías existentes, y otros aspectos particulares de cada sitio que se entienda necesario considerar.

5.3.2 Estudio geológico

El estudio geológico realizado en la selección de sitio permite identificar las formaciones geológicas del sitio y su entorno, la profundidad a la que se encuentran y la potencia o espesor de cada una. De acuerdo a la disponibilidad de los distintos materiales existentes en el sitio se definirá el paquete impermeable a construir, el material de cobertura a utilizar, el material para drenes y la necesidad de materiales de préstamo.

5.3.3 Estudio hidrogeológico

El estudio hidrogeológico permite definir la existencia o no de materiales acuíferos y sus características. Esta información será la base para definir la profundidad de las celdas (respetando la distancia al nivel freático), el tipo de relleno a diseñar, la ubicación y características de los pozos de monitoreo de la calidad de agua subterránea.

5.3.4 Estudio hidrológico

Conocer la hidrología de la zona permite diseñar una adecuada gestión de las aguas superficiales, las cuales deben ser desviadas para minimizar el aporte de aguas al relleno y así minimizar la generación de lixiviados.

El estudio hidrológico debe contener al menos la siguiente información:

- a. Determinación de la(s) cuencas que involucran al predio.
- b. Determinación del punto de vertido del lixiviado tratado.

5.3.5 Relevamiento topográfico

La topografía del sitio en primera instancia permite diseñar el *layout* del relleno sanitario y realizar el balance de materiales. Se debe buscar minimizar los movimientos de tierra y minimizar la necesidad de bombes del lixiviado y la afectación al relleno por las escorrentías de los excesos de lluvia.

5.3.6 Recopilación de datos meteorológicos

La información meteorológica necesaria para el diseño comprende principalmente datos históricos de:

- a. precipitación media anual,
- b. evaporación media anual,
- c. direcciones y velocidades de vientos predominantes,

La precipitación anual y la evaporación son útiles para realizar balances hídricos al relleno, para calcular la generación de lixiviados y los escurrimientos superficiales.

Conocer los vientos predominantes permite identificar hacia donde se dirigirán los olores y los arrastres de residuos por el viento y diseñar las barreras para mitigar estos impactos. Además esta información es necesaria para conocer la dispersión de los contaminantes atmosféricos emitidos, sea por el propio relleno, las antorchas, las máquinas, etc.

Estos estudios se realizan con el objetivo de determinar:

- la permeabilidad y espesor de la capa que oficiará de barrera para los contaminantes,
- la existencia de fallas geológicas o zonas de alta permeabilidad,
- la cantidad disponible de material de cobertura,
- la capacidad soporte del material de base,
- la estabilidad de los taludes,
- régimen de flujo subterráneo, particularmente la identificación de la existencia de zonas de recargas de acuíferos,
- línea de base de la calidad del agua superficial y subterránea.
- la hidrología superficial del predio
- posibles afectaciones a vecinos cercanos

5.4 DEFINICIONES Y CÁLCULOS BÁSICOS

5.4.1 Criterios de admisión

Los criterios de admisión definen las características de los residuos que serán admitidos en el relleno sanitario. En términos generales, los rellenos sanitarios son instalaciones diseñadas para recibir residuos sólidos tales como:

- a) Residuos sólidos domiciliarios (RSD): son aquellos generados en actividades propias realizadas en las viviendas.
- b) Residuos de vías públicas (RVP): residuos generados en la limpieza y barrido de la vía pública, ferias, playas, animales muertos, podas y mantenimiento de áreas verdes, etc.
Tanto el servicio de recolección de residuos sólidos domiciliarios como el servicio de barrido y limpieza de la vía pública es brindado por los Gobiernos Departamentales, ya sea en forma directa o por empresas tercerizadas.
- c) Residuos sólidos de pequeños generadores (RPG): son aquellos generados en actividades comerciales y de servicios con composición y cantidad similar a los residuos domiciliarios.
El servicio de recolección de pequeños generadores en algunos casos es realizado por los Gobiernos Departamentales, por empresas privadas o bien por el propio generador.
- d) Residuos sanitarios no contaminados (RSnOC): son los residuos sanitarios comunes (generados en centros de atención a la salud, con composición similar a los residuos domiciliarios) y residuos sanitarios contaminados tratados, según Decreto N°586/09.
- e) Residuos de obras civiles (ROC) originados en actividades de construcción y demolición de característica no peligrosa, incluyendo “escombros”.
- f) Residuos de origen industrial (RSI) definidos como Categoría II de acuerdo al Decreto N°182/13

Las características que deben cumplir los residuos sólidos para ingresar a un relleno sanitario son:

- a) Humedad < 70%
- b) Sin líquidos libres

5.4.2 Residuos no admisibles

Los residuos que no deben ser admitidos (residuos prohibidos) en un relleno sanitario por comprometer la operación y presentar riesgos para el ambiente y la salud son:

- a) Residuos con características de peligrosidad, definidos como Categoría I de acuerdo al Decreto N°182/13.
- b) Residuos de baterías plomo ácido regulados por el Decreto N°373/03.
- c) Residuos sanitarios contaminados, no tratados, regulados por el Decreto N° 586/09.
- d) Residuos radiactivos.
- e) Residuos líquidos.
- f) Neumáticos fuera de uso.
- g) Vehículos fuera de uso.
- h) RAEE (residuos de aparatos eléctricos y electrónicos)

5.4.3 Caracterización de los residuos a disponer

La caracterización de residuos sólidos implica determinar el porcentaje en peso de cada material que componen los residuos de la zona para la cual se diseña el relleno.

Resulta útil contar con una caracterización de los residuos de la(s) localidad(es) que serán servidas por el relleno sanitario que se está diseñando. Esta caracterización es muy importante en la elaboración del sistema de gestión de residuos en su totalidad, más allá de su utilidad en el diseño del relleno sanitario. Para una caracterización representativa se deben tener en cuenta varias variables, por ejemplo, planes de recuperación de materiales, presencia de recolectores informales, variabilidad anual de la población, etc.

Uno de los estándares más utilizados para la caracterización de residuos es la ASTM D5231-92 “Standard Test Method for Determination on the Composition of Unprocessed Municipal Solid Waste”.

La caracterización de residuos para el diseño de un sitio de disposición final deberá contener:

- % de materia orgánica,
- % de papel y cartón,
- % de plástico,
- % de vidrio,
- % de metales,
- % de otros.
- contenido de humedad

En el Anexo 9.3 se presentan antecedentes de caracterizaciones existentes en Uruguay.

5.4.4 Estimación de la cantidad de residuos

Como fuera presentado en el capítulo 4.3.3, la cantidad de residuos a disponer en cada año (medida en kg) se calcula como el producto de la población a servir (Pob), por la tasa de generación (*tasa en $\frac{kg}{hab*día}$*), por $365 \frac{día}{año}$. El total de residuos a disponer (TR) es la suma de dicho producto para cada año (i) a lo largo de la vida útil del proyecto.

$$TR (kg) = \sum_{i=1}^{i=vida\ útil} (Pob * tasa * 365)_i$$

En esta sección se plantea ajustar el cálculo de la cantidad diaria de residuos a disponer en cada año de vida útil del relleno, se agrega al cálculo el porcentaje de cobertura del servicio de recolección:

$$TR_i (kg) = (n^o\ hab * tasa * 365 * \%_c)_i$$

Donde:

TR_i es la cantidad de residuos en el año i (kg/año)

Pob_i es la población urbana de la localidad en el año i (habitantes)

$tasa_i$ es la tasa de generación de residuos ($\frac{kg}{hab*día}$) para el año i

$\%_c$ es el porcentaje de cobertura del servicio de recolección de residuos para el año i

Como primera aproximación al **crecimiento poblacional** se recomienda diseñar el tamaño del relleno sanitario con las proyecciones de población del Instituto Nacional de Estadísticas (INE).

En términos generales en Uruguay la tasa de crecimiento de población es baja, por lo cual puede darse que para una localidad la población no varíe prácticamente, o bien disminuya. Por otra parte, se debe tener en cuenta que si se trata de localidades con fuerte presencia de turistas la población puede variar considerablemente a lo largo del año.

Para la **tasa de generación** de residuos sólidos se recomienda tomar el valor correspondiente al departamento de acuerdo a la **Tabla 9-3**. También puede ser obtenida de campañas de pesaje realizadas en el departamento. La tasa puede variar de un departamento a otro dependiendo de la existencia de políticas de separación en origen, de recuperación de materiales y de reciclaje, además de patrones de consumo.

La **variación en el tiempo de la tasa de generación** se suele proyectar en función de la variación del PBI del país, asumiendo un coeficiente proporcional entre ambas variables.

El **porcentaje de cobertura del servicio** de recolección de residuos puede variar de un año a otro a medida que se incorporan zonas no servidas, o también por el crecimiento del área urbana.

En el Anexo 9.3.2.1 se presenta un ejemplo de cálculo.

La cantidad de residuos a disponer a lo largo de la vida útil del relleno es la suma de los residuos a disponer a lo largo de todos los años de servicio de la instalación, o sea:

$$TR(kg) = TR_1 + TR_2 + \dots + TR_{VU}$$

donde VU es la vida útil del proyecto.

5.4.5 Método de operación de un relleno sanitario

De acuerdo a la OMS y CEPIS los rellenos sanitarios se clasifican en rellenos de operación semimecanizada, mecanizada y manual.

Los rellenos sanitarios semimecanizados, recomendados para tamaños entre 16 y 40 ton/día son aquellos en los que se utiliza una misma máquina para las distintas tareas de tendido, compactación y cobertura. La máquina recomendada para estas funciones es una pala combinada (pala cargadora con retroexcavadora), ver ejemplo en **Figura 5-1**.

La compactación alcanzada varía entre 300 a 600 kg/m³. En este tipo de relleno se prioriza economizar el costo operativo por sobre la vida útil del relleno (la cual aumenta con el grado de compactación).

Figura 5-1: Pala combinada⁷



Figura 5-2: Tractor topador sobre orugas⁸



Los rellenos sanitarios mecanizados, recomendados para poblaciones que generan más de 40 ton/día, utilizan maquinarias específicas para cada una de las tareas de compactación, movimiento de tierra y cobertura. La densidad de compactación alcanzada varía entre 600 a 1000 kg/m³.

En este tipo de rellenos, una vez que los camiones descargan los residuos, se utiliza una máquina topadora sobre orugas (ver **Figura 5-2**) para distribuirlos a lo largo del frente de trabajo en capas de no más de 40 cm de espesor. Luego, por pasadas sucesivas por encima de los residuos la topadora los compacta (se recomiendan como mínimo 4 pasadas para obtener una densidad mínima de 600-700 kg/m³).

Para rellenos grandes, se puede utilizar un compactador de residuos específico para esta tarea (ver **Figura 5-3**), y así llegar a una compactación mayor. Una vez que finaliza la jornada, se distribuye el material de cobertura de los residuos con una pala o la topadora. Eventualmente se pueden requerir de otros equipos para el traslado del material de cobertura.

Se recomienda que el tamaño mínimo de un relleno sanitario mecanizado sea para gestionar más de 40 ton/día.

⁷ Extraído de www.komatsu.eu

⁸ Extraído de www.cat.com

Figura 5-3: Compactador de residuos BOMAG BC-672⁹ **Figura 5-4: Relleno de fardos¹⁰**



Para definir el tipo de relleno para las poblaciones que generan **menos de 16 ton/día se requieren de estudios específicos** para cada caso, donde se evalúen alternativas de sitios cercanos a donde enviar los residuos, o la conveniencia de métodos de operación más artesanales (p.e. rellenos manuales con alto requerimiento de mano de obra).

Los rellenos sanitarios de fardos son rellenos en los que los residuos previo a disponerse son enfardados por medio de máquinas específicas, tal como lo muestra la **Figura 5-4**. Es necesario destacar que este tipo de operación no evita la construcción del paquete impermeable y los sistemas de gestión de lixiviados y biogás, necesarios para todo relleno sanitario.

Estimada la generación total por departamento, resulta que los departamentos con generación menor a 40 ton/día son Durazno, Flores, Río Negro y Treinta y Tres. A priori en estos departamentos, si el relleno fuera a servir a los departamentos de forma individual, sería conveniente utilizar la operación semimecanizada.

5.4.6 Estación de transferencia

La función de una estación de transferencia (ET) es optimizar el transporte de los residuos en largas distancias. Una estación de transferencia es una instalación donde se reciben los residuos transportados desde los circuitos de recolección en los camiones específicos para la recolección. Luego los residuos son descargados y cargados en camiones (o en vagones) con mayor capacidad de carga, los que transportan los residuos hasta el relleno sanitario (ver **Figura 5-8**).

A la hora de considerar la existencia de una ET hay que tener en cuenta lo recomendado a nivel internacional:

1. La ET reciba más de 50 ton/día
2. La ET se ubique a menos de 10 km del centro de masa de generación.
3. La existencia de una ET se justifica si el relleno sanitario se encuentra a más de 25km del centro de masa de generación [3].

El tipo de ET depende, entre otras cosas, del diseño de los circuitos de recolección y sus horarios. Si los camiones recolectores arriban a la estación concentrados en un mismo horario, la ET necesitará una zona de acopio de residuos para absorber la llegada de los residuos conjuntamente. Otro tipo de ET es la de descarga directa, donde el camión recolector descarga directamente sobre el camión que realiza el transporte.

⁹ extraído de www.bomag.com

¹⁰ Extraído de www.vanguardia.com

La ET debe ser techada para evitar el contacto de agua pluvial con los residuos, evitar voladuras, etc. La misma puede tener o no compactación de residuos, dependiendo de la cantidad de residuos a transportar y la distancia.

Figura 5-5: ET con transferencia directa y Figura 5-6: ET con acopio sin compactación [14] compactación [14]



Figura 5-7: ET con transferencia directa sin compactación[14] y Figura 5-8: Camión semirremolque [14]



En todos los casos se debe considerar la carga máxima permitida para las rutas por donde circulará el camión que realiza el transporte hacia el relleno sanitario.

El diseño de la estación de transferencia deberá considerar la reducción de impactos en el entorno circundante. Entre los aspectos básicos a resolver se encuentran:

- a) Manejo de líquidos escurridos de los residuos y aguas de lavado
- b) Reducción de ruido
- c) Reducción de polvo y olores
- d) Control de vectores

5.5 COMPONENTES DEL RELLENO SANITARIO

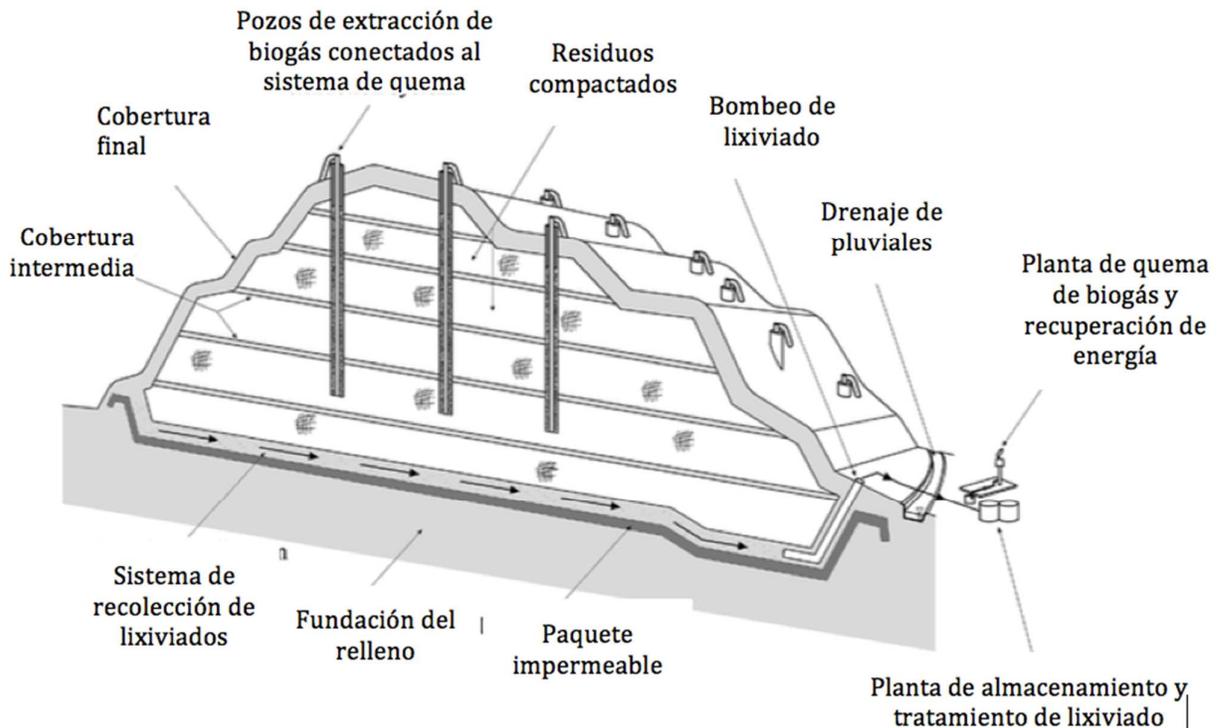
Las principales componentes de un relleno sanitario se detallan a continuación:

1. La fundación del relleno refiere al material con el cual se cubre el terreno una vez que se haya realizado la limpieza del mismo. Dicho material debe tener la capacidad de soportar el peso de los residuos y el material de cobertura que luego serán dispuestos sobre él y las pendientes necesarias para el escurrimiento de los líquidos.
2. La barrera impermeable está conformada por material natural y/o sintético y es el material que aísla el relleno del entorno, evitando la migración del lixiviado hacia el subsuelo.
3. El sistema de recolección de lixiviados permite su captación a través de drenes y conducirlo hacia la planta de tratamiento por gravedad o a través de una estación de bombeo.

4. La planta de tratamiento de lixiviado es diseñada para reducir la concentración de ciertos parámetros para viabilizar el vertido al ambiente, cumpliendo con lo exigido por la reglamentación vigente en efluentes líquidos.
5. La capa de cobertura es colocada con frecuencia diaria o similar, encima del residuo compactado con el objetivo de evitar el escape de gases, olores, voladuras y facilitar el desvío de pluviales.
6. Los gases generados en la descomposición de los residuos (biogás) son captados por sistemas diseñados para tal fin, ya sea para ventilarlos o conectarlos a un sistema de extracción para su quema o aprovechamiento energético.
7. La gestión del agua pluvial del predio se realiza con el objetivo de evitar el escurrimiento hacia el relleno, a través de canales de recolección que descargan en el curso de agua cercano.
8. La capa de cobertura final es colocada al finalizar la vida útil, cumple la función de evitar el ingreso de agua pluvial, el escape de gases y de olores.
9. La infraestructura conexas incluye control de ingreso, caminería, barreras vegetales, entre otros.
10. La infraestructura de control ambiental, incluye el control de aguas subterráneas, superficiales, lixiviado, gases, entre otros.

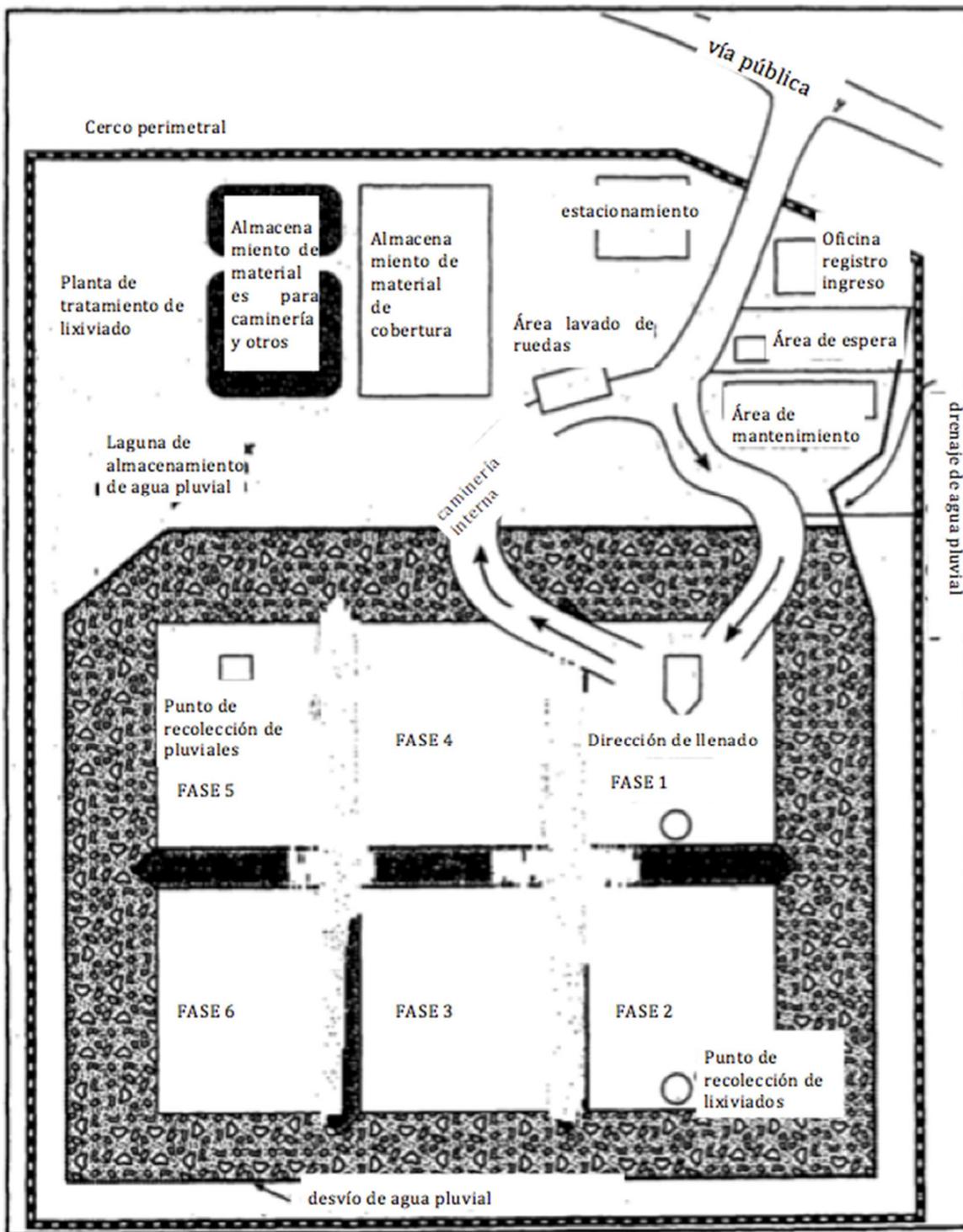
La **Figura 5-9** presenta un detalle de las componentes 1 a 8, en este ejemplo se plantea que el biogás es recuperado para generación de energía.

Figura 5-9: Componentes 1 a 8 de un relleno sanitario (adaptado de [1])



El desarrollo en planta del relleno se esquematiza en el *layout* del relleno, el cual indica claramente la zona donde se dispondrán los residuos e identifica el emplazamiento de cada una de las componentes. La **Figura 5-10** muestra un ejemplo.

Figura 5-10: Ejemplo de *layout* de un relleno sanitario [1]



Nota: la oficina de registro e ingreso tiene asociada una balanza.

5.5.1 Plan de llenado

El plan de llenado es el cronograma de llenado del área dentro del sitio destinada a disponer residuos, es decir que establece el lugar físico por donde se comienza a depositar los residuos y cómo se continúa.

En general, el área destinada a recibir residuos se divide en fases o en módulos. De acuerdo a la vida útil y al tamaño del relleno, las fases pueden ser 2, 3, 4 o más. El desarrollo del relleno en fases permite diferir el desembolso de la inversión en varios años, tiene como contrapartida que en un mismo momento puedan coexistir en el sitio fases en construcción, otras en operación y otras en etapa de abandono. La **Figura 5-10** muestra un ejemplo del desarrollo de un relleno sanitario en seis fases.

Cada fase del relleno se divide en subfases o celdas de operación, cada celda de operación se diseña tomando como criterio un período de uno a varios meses. Esta división permite gestionar en forma diferenciada el agua pluvial que escurre por las celdas con residuos de la que escurre por zonas “limpias”.

5.5.1.1 Celda de operación y celdas diarias

La **celda de operación** tiene una geometría trapezoidal con taludes laterales 1V:3H. Las celdas cuentan con bermas de contención con drenaje perimetral que impide el ingreso de agua pluvial a la celda y bermas internas para separar el agua pluvial.

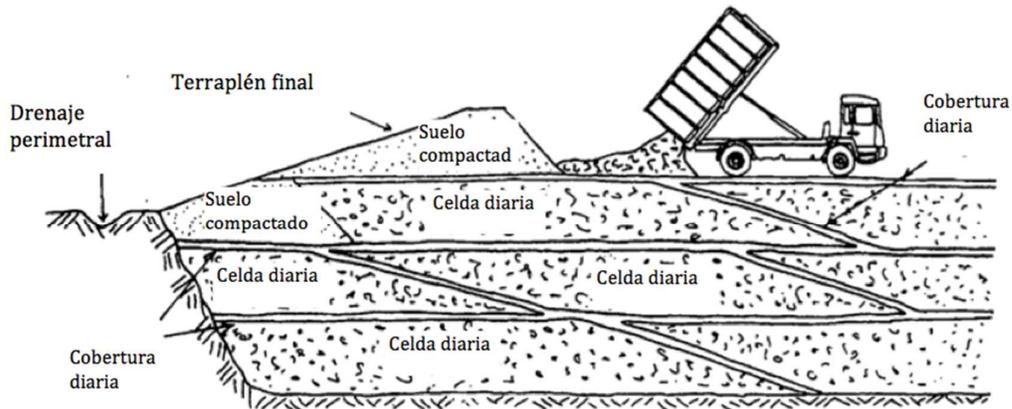
A su vez, la celda de operación se conforma por **celdas diarias**, la que se define como la unidad básica de operación del relleno sanitario; se puede definir teóricamente como un paralelepípedo o bloque y está constituida por la cantidad de residuos que se entierra en un día y por el material necesario para cubrirla (capa de 15 a 20cm). Su ancho equivale al frente de trabajo necesario para que los vehículos recolectores puedan descargar los residuos y para que la maquinaria de esparcimiento y compactación pueda circular. El largo o avance está definido por la cantidad de residuos que llega al relleno en un día y la altura se define de manera de poder realizarla operativamente con los equipos disponibles y lograr la compactación planificada.

Se llama **frente de trabajo** al sitio donde los vehículos que transportan los residuos los descargan para luego tenderlos y compactarlos. Este lugar de trabajo debe estar siempre operativo e inclusive con intensas lluvias.

Cada celda diaria de residuos se ubica una al lado de otra en forma secuencial para rellenar el sitio y conformar una celda de operación **Figura 5-11**. Es así que el plan de llenado establece el avance de las distintas fases, celdas de operación y celdas diarias.

En general, se avanza desde la celda de operación que se encuentra más aguas abajo hacia aguas arriba. Esto permite conducir el lixiviado hacia la planta de tratamiento y el agua pluvial limpia (que se encuentra aguas arriba) hacia el sistema de pluviales (ver Gestión del agua superficial 5.5.7).

Figura 5-11: Celda de operación y celdas diarias [6]



5.5.1.2 Cobertura diaria e intermedia

La tapada o **cobertura diaria** es la capa de material con la que se cubren los residuos al final del día, en general tiene un espesor de 15 a 20 cm.

En la operativa del relleno sanitario es fundamental que los residuos sean tapados diariamente o en su defecto con una frecuencia ligeramente mayor.

La cobertura diaria permite:

- Evitar el ingreso de agua pluvial y así minimizar la generación de lixiviado, permitiendo su escurrimiento.
- Disminuir voladuras y malos olores
- Disminuir la presencia de vectores (aves, insectos, roedores)
- Evitar el ingreso de personas en búsqueda de recuperación de materiales
- Disminuir el escape del biogás
- Evitar la combustión espontánea (evitando el contacto del oxígeno con el biogás)

La **cobertura intermedia** se utiliza para finalizar la celda operativa, siendo el material de cobertura de baja permeabilidad (para evitar el pasaje de agua pluvial) y se coloca en espesores de 30 cm aproximadamente.

La disponibilidad de material de cobertura fue estudiada a la hora de seleccionar el sitio. En el diseño se debe definir qué zonas del predio serán utilizadas para extraer material de cobertura. De ser necesario el almacenamiento en el predio, éste debe ser realizado en forma adecuada, evitando arrastre en épocas de lluvia y claramente clasificado e identificado.

Cuando exista déficit de material de cobertura se pueden utilizar materiales alternativos como ser:

- a) lonas plásticas reutilizables;
- b) escombros (sin armaduras) o algún otro material inerte que llegue al relleno y
- c) compost

5.5.2 Previsión de personal para la operación

La operación de un relleno sanitario requiere una organización adecuada con la participación de un equipo de personas, comprometidas con su función y misión específica.

En lo que respecta al plantel general de operación, este dependerá del tamaño del relleno, las características y la operativa planteada. Un relleno mediano (40 a 300 ton/día) contará en cada área con

supervisores, capataces, operadores de equipos y personal auxiliar debidamente capacitado, para los distintos turnos de trabajo necesarios.

La conducción técnica del relleno debería estar a cargo o bajo el asesoramiento de un profesional idóneo en Ingeniería Sanitaria, con la experiencia adecuada para dirigir todas las tareas inherentes al relleno.

Asimismo se requerirá el apoyo periódico de un equipo técnico como entre los que se cuentan dibujantes, topógrafos y ayudantes. Dichos equipos pueden estar permanentes en el relleno o asistir periódicamente a la gestión del relleno.

Para realizar la previsión de personal necesario para la operación del relleno se deben considerar varias variables:

- a) Tipo de relleno
- b) Días laborables, turnos y horarios de funcionamiento
- c) Área del relleno
- d) Cantidad diaria de residuos a disponer
- e) Disponibilidad y ubicación del material de cobertura

La **Tabla 5-1** presenta referencias para estimar las necesidades típicas de personal de acuerdo al tamaño del relleno sanitario.

Tabla 5-1: Necesidades de personal según tamaño de relleno [13]

Calificación y tareas del personal	Número de personas		
	Relleno pequeño (16 a 40 ton/día)	Relleno mediano (40 a 300 ton/día)	Relleno grande (>300 ton/día)
	Compactación semi mecanizado	Compactación mecanizada	
Jefe del relleno (ingeniero civil, ingeniero mecánico o tecnólogo ambiental)	0.5	0.5 - 1	1
Ayudante del jefe del relleno (tecnólogo)	0	0	1
Técnico de laboratorio o químico	0	0	1
Responsable de la balanza	1	1	2
Chofer de compactador	0	1-2	3
Chofer de camión u otra maquinaria necesaria dentro del relleno	1	1-2	2-3
Técnico para reparaciones de vehículos	0	0	1
Ayudante para reparaciones de vehículos	0	1	1
Obreros de relleno con las siguientes tareas: <ul style="list-style-type: none"> • construcción de chimeneas • limpieza de canales de drenaje y cunetas • mantenimiento de la planta de tratamiento de lixiviados 	1	2-3	3-6

Calificación y tareas del personal	Número de personas		
	Relleno pequeño (16 a 40 ton/día)	Relleno mediano (40 a 300 ton/día)	Relleno grande (>300 ton/día)
	Compactación semi mecanizado	Compactación mecanizada	
Guardia con las siguientes tareas: <ul style="list-style-type: none"> • Presencia continua sobre el relleno • Prohibir el ingreso de personas no autorizadas • Prohibir y controlar que no ingresen animales al relleno • Registro en la balanza • Avisar el lugar de descarga a los camiones recolectores 	1-2	2	3

5.5.3 Maquinaria necesaria para la operación

A la hora de operar un relleno las inversiones a realizar en maquinaria son importantes. La maquinaria a seleccionar depende principalmente de la cantidad diaria de residuos entre otros factores. Las funciones básicas de la maquinaria son [1]:

- Relacionadas con el suelo (excavación, tendido, compactación)
- Relacionadas con los residuos (tendido, compactación)
- Funciones de apoyo (caminos, drenajes, etc.)

Dependiendo del tipo y tamaño del relleno, una máquina versátil puede servir para todas las funciones.

5.5.3.1 Funciones relacionadas con el suelo

Las funciones relacionadas con el suelo refieren a las actividades de excavación, tendido y compactación de los suelos utilizados como cobertura. Los procedimientos y equipos para realizar estas tareas son semejantes a los utilizados en otras operaciones de movimiento de tierras (por ejemplo, construcción de carreteras).

Equipos sobre ruedas (tal como una retroexcavadora) son suficientes para excavar suelos tales como arena, grava, arcilla y limos, mientras que la pala mecánica se usa para cargar. Si el suelo es movido a distancias menores de unos 100 m, se pueden usar palas mecánicas y buldócer. Para transportar suelos a distancias mayores se puede utilizar cualquier camión volcador o similar.

5.5.3.2 Funciones relacionadas con los residuos

Las funciones relacionadas con los residuos refieren al tendido y la compactación. Los más adecuados son los compactadores, sin embargo para casos de pequeña escala, se pueden utilizar los equipos de movimiento de tierras, como un topador sobre orugas.

Alcanzar una buena compactación de residuos tiene muchos efectos a corto y largo plazo sobre el funcionamiento del relleno, siendo un factor importante para maximizar la vida útil del mismo y posibilitar alturas mayores.

El equipo pesado diseñado específicamente para la compactación es más eficaz y eficiente que un equipo liviano diseñado principalmente para movimiento de tierra. Sin embargo, la diferencia de peso puede ser compensada por un aumento en el número de pasadas del equipo liviano.

5.5.3.3 Funciones de apoyo

Las funciones de apoyo refieren a la construcción de caminería temporaria, construcciones de drenajes, barreras corta fuego, remoción de camiones atracados, entre otros.

La **Tabla 5-2** presenta el desempeño en las distintas tareas de cada uno de los equipos comúnmente utilizados en rellenos sanitarios.

Tabla 5-2: Funcionalidades de distintos equipos (adaptado de [9])

Tipo	Residuos sólidos		Suelo			Funciones de apoyo
	Tendido	Compactación	Excavaciones	Cobertura	Transporte	
Topador sobre orugas	E	B	P	E	NA	B
Compactador de residuos	E	E	P	B	NA	P
Pala combinada sobre orugas	B	B	E	E	A	B
Pala combinada sobre neumáticos	P	P	E	B	B	B

Nota: E=excelente, B=bueno, A=adecuado, P=pobre, NA=no aplica.

El tamaño del relleno definirá la maquinaria necesaria para la operación, determinando si el tipo de operación será semimecanizado o mecanizado.

Es necesario definir si el tamaño del relleno justifica la existencia de un compactador o de un tractor de orugas. En el Anexo 9.9 se presenta un ejemplo de cálculo para definir la necesidad de maquinaria.

Tabla 5-3: Necesidades de maquinaria según tamaño de relleno [9]

Calificación y tareas del personal	Relleno pequeño (16 a 40 ton/día)	Relleno mediano (40 a 300 ton/día)	Relleno grande (>300 ton/día)
	Compactación semi mecanizado	Compactación mecanizada	
Topador sobre orugas	0	1	2
Compactador de residuos	0	0	1
Pala combinada sobre orugas	0	0	1
Pala combinada sobre neumáticos	1	1	1

5.5.4 Especificaciones para la impermeabilización de fondo y paredes laterales

La impermeabilización de fondo y de paredes laterales se diseña con el objetivo de prevenir la contaminación tanto de aguas superficiales como subterráneas. La impermeabilización puede ser construida con materiales propios del sitio o materiales de préstamo (arcillas naturales), con materiales sintéticos (geomembranas) o con materiales compuestos (arcillas geosintéticas) o una combinación de ellos.

La primera etapa de la impermeabilización es la preparación de la base o fundación donde se emplazará el relleno. Esta capa de material, de preferencia existente en el predio, se extiende sobre el terreno limpio y las paredes laterales, se debe construir con un espesor uniforme entre los 25 y 50 cm y ser compactada hasta alcanzar densidad equivalente al 90 % del Proctor Modificado.

Sobre esta base se emplaza el paquete impermeable, conformado por una capa de material natural (arcillas con baja conductividad hidráulica) o material sintético o una combinación de ambos y el sistema de recolección de lixiviados.

Este paquete tiene que tener la capacidad soporte tanto de su peso propio como de las distintas capas del relleno que irán sobre él. Adicionalmente este paquete no debe sufrir alteraciones de su conductividad hidráulica por acción del lixiviado y los residuos.

5.5.4.1 Especificaciones para arcillas naturales

En la segunda etapa, para lograr la protección del medio, se coloca una capa de arcilla de espesor predefinido (1,0m) con una conductividad hidráulica requerida in situ, la arcilla debe tener una alta plasticidad y una distribución de tamaño de partícula adecuada.

La **Tabla 5-4** presenta las características a considerar para utilizar una arcilla para conformar el paquete impermeable.

Tabla 5-4: Especificaciones para arcillas (adaptado de [3] y [13])

Propiedad	Rango	Norma de ensayo	Comentario
Espesor (m)	>1,0		
Conductividad hidráulica (cm/s)	$<1 \cdot 10^{-7}$	ASTM D5093	Valor a alcanzar una vez trabajado el material a la humedad óptima.
Porcentaje de finos (partículas <0.075mm)	$\geq 20 \%$	ASTM D422	Alto contenido de arcilla y limo tendrá una baja conductividad.
Porcentaje de grava (partículas >4.75mm)	$\leq 10\%$		
Índice de plasticidad	10 – 30%	ASTM D4318	Suelos con bajo índice de plasticidad no alcanzan permeabilidades bajas. Suelos con alto índice de plasticidad se cuartejan y quiebran al secarse y son muy pegajosos y difíciles de trabajar cuando están húmedos.
Tamaño de partícula máximo (mm)	25		El material debe ser bien graduado. El tamaño de partícula no puede afectar la integridad del material sintético.
Contenido de materia orgánica (%)	<5	ASTM D2974	
Compactación (densidad)	$\geq 90\%$	ASTM D1557	Proctor Modificado

La arcilla debe ser compactada hasta alcanzar la conductividad hidráulica requerida, para lo que se debe considerar la humedad con la que se trabaja. La norma de referencia para el ensayo de humedad es la ASTM D2216.

Como alternativa al paquete conformado por arcilla compactada, se puede conformar un paquete combinándola con:

- arcillas sintéticas o
- geomembrana superpuesta

5.5.4.2 Especificaciones para arcillas sintéticas

Para mejorar las características de permeabilidad se mezcla la arcilla natural con un 5 a 10% de bentonita, denominada **arcillas sintéticas**.

Los requerimientos para las arcillas sintéticas son los mismos que para una arcilla natural, es decir, que se logre una conductividad hidráulica $<1 \cdot 10^{-7}$ cm/s para 1m de espesor de material.

Otra forma de utilización de las arcillas sintéticas, es el geocompuesto de bentonita, que consiste en un paquete fabricado con una capa de bentonita entre dos capas de material geotextil con una conductividad hidráulica inferior a 5×10^{-13} cm/s.

5.5.4.3 Especificaciones para geomembranas

Las **geomembranas** más utilizadas son de PEAD o PVC las cuales deben tener un espesor mínimo de 0.8 para PVC y 1.5 mm para PEAD. Para asegurar la calidad se debe requerir a los fabricantes los ensayos que aseguren:

1. Capacidad de soportar los esfuerzos mecánicos a los que son sometidas en el relleno (resistencia adecuada al desgarro, resistencia al punzamiento y resistencia al daño en la instalación).
2. Resistencia a la degradación causada por factores tales como ataque químico, temperatura, oxidación y agrietamiento por estrés durante toda la vida útil del relleno (incluyendo los períodos de operación y clausura).

La **Tabla 5-5** plantea las normas de calidad a considerar para la selección de la geomembrana.

Tabla 5-5: Especificaciones para la geomembrana

Prueba	Norma de ensayo	Especificación PEAD	Especificación PVC
Espesor	ASTM D5199 (liso) ASTM D5994 (texturizado)	≥ 1.5 mm	≥ 0.8 mm
Densidad	ASTM D1505	≥ 0.94 g/cm ³	≥ 1.24 g/cm ³
Resistencia al punzamiento	ASTM D4833	480 N	220 N
Resistencia elástica	ASTM D638	22 KN/m	5.6 KN/m
Resistencia a la ruptura		49 KN/m	12.8 KN/m
Resistencia al desgarro	ASTM D1004	187 N	35 N
Envejecimiento en estufa a 85 °C	ASTM D 5721	55 %	
Tiempo de oxidación inductiva, % retenido tras 90 días.	ASTM D 3895		

El desempeño de la geomembrana depende de la presencia de imperfecciones en las soldaduras, pinchaduras o rajaduras. Es importante colocar la geomembrana por encima de material natural de baja permeabilidad y asegurar una interfase homogénea de material/geomembrana. Las precauciones para la colocación de la geomembrana son planteadas en el capítulo 6.

Sobre el paquete impermeable se emplaza la capa drenante para la recolección de lixiviados el cual se describe en el siguiente punto.

5.5.5 Gestión del lixiviado

La generación del lixiviado se debe a:

- a) El agua de lluvia que infiltra a través de los residuos, arrastrando el material suspendido y soluble originado en la descomposición de los mismos.
- b) La liberación de líquido tanto debido a la humedad presente en los residuos como derivada de la descomposición de los mismos.

Los métodos para estimar la generación de lixiviado se plantean en el Anexo 9.4. La gestión del lixiviado comienza por minimizar su generación, para alcanzar este objetivo se recomienda:

- a) Mantener el área de trabajo lo más pequeña posible
- b) Separar las aguas que escurren por áreas del relleno no activas de las aguas del frente de trabajo (a través de la construcción de bermas y terraplenes)
- c) Respetar la planificación de las distintas etapas del relleno y realizar la tapada final de las celdas ya completas.

El lixiviado es captado por el sistema de drenes y conducido hacia el sistema de tratamiento.

5.5.5.1 Sistema de recolección de lixiviados

Los sistemas deben contener un sistema de recolección de lixiviados. El mismo consiste en una capa drenante que se extiende de manera uniforme por encima del paquete impermeable y una red de drenes. En algunos casos el costo de colocar una capa drenante uniforme por encima de paquete impermeable es un costo muy significativo y se opta por colocar únicamente los drenes en forma de espina de pescado. La **Figura 5-12** ilustra lo mencionado.

La **capa drenante** consiste en una capa de geotextil, luego una capa de por lo menos 300mm de grava. La misma se cubre con geotextil para evitar la colmatación con los residuos. En caso de que el paquete impermeable sea con geomembrana, también se coloca un geotextil de protección previo a la capa drenante. El geotextil debe ser de poliéster o polipropileno, con suficiente resistencia y espesor para soportar las tensiones a las que será sometido durante el servicio.

La grava debe ser cuidadosamente seleccionada y tener las siguientes características:

1. no tener forma y angulosidad que dañen el revestimiento de geomembrana subyacente (el mejor tipo de grava es redondeado y de superficie lisa)
2. ser colocada en una capa continua de al menos 300 mm de espesor a lo largo de toda la base de la celda de relleno sanitario, inclinada con al menos un pendiente longitudinal del 1% y una pendiente transversal del 3%.

La red de drenes se coloca de forma longitudinal y transversal. Para favorecer el drenaje de los lixiviados se suele construir la red de drenes en forma de espina de pescado.

El sistema de recolección de lixiviados tiene la función de evacuar hacia afuera del relleno los lixiviados controlando del nivel de lixiviado por encima del paquete impermeable.

Los drenes se componen de tuberías perforadas rodeados de grava envuelta en geotextil para evitar la colmatación.

Las tuberías de recolección de lixiviado deben ser flexibles (típicamente polietileno de alta densidad) con un diámetro interno de por lo menos 150 milímetros (los cálculos de balance hídrico y caudal de lixiviado

deben confirmar el tamaño de tubería necesaria). En el Anexo 9.5 se presenta la fórmula de cálculo para estimar la separación entre drenes.

El material drenante puede ser sustituido por un material sintético o geodren con los mismos requerimientos de conductividad hidráulica y de nivel por encima del paquete impermeable.

La red de drenaje es conducida por gravedad hacia un punto del relleno desde donde se conduce a la planta de tratamiento por gravedad o por bombeo dependiendo del tipo de relleno.

En la **Figura 5-13** se presenta un ejemplo de las distintas capas que componen el paquete impermeable y drenante. Comenzando desde abajo hacia arriba se tiene, la fundación, seguida por 1m de material natural (el cual se sugiere sea colocado y compactado en capas de 0.25m), seguido por una geomembrana, por encima de ella un geotextil de protección, luego el sistema de recolección de lixiviados, por encima otro geotextil. Por último, encima de este paquete se disponen los residuos.

Figura 5-12: Red de drenes en forma de espina de pescado [13]

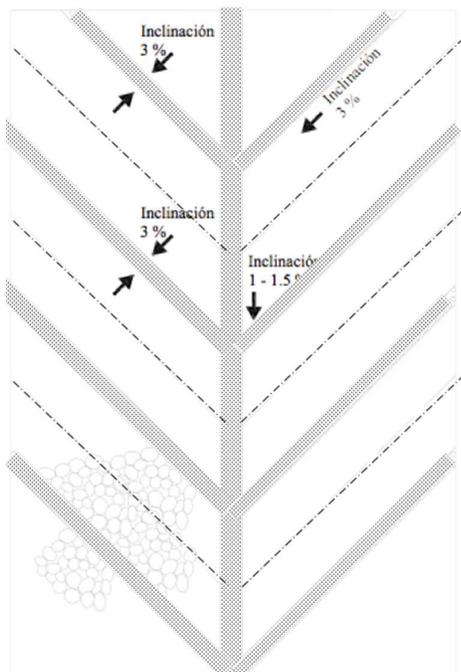
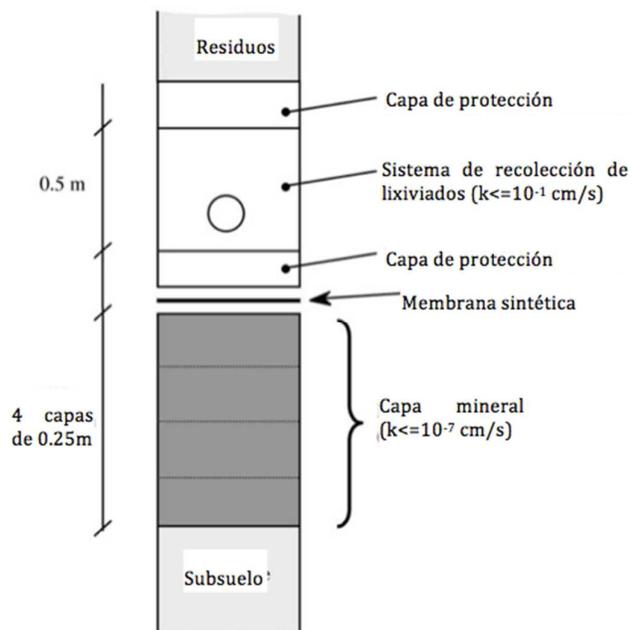


Figura 5-13: Ilustración del paquete impermeable y drenante [1]



En caso de que la red drenante se reduzca a los drenes en forma de espina de pescado, debe colocarse una capa de protección fuera del área de drenes que proteja el material sintético ante cualquier daño y permita la circulación de personas y vehículos. En general se busca sea de tierra sin componentes filosos y se coloca en espesores de 15 a 20cm.

La **Tabla 5-6** resume las características del paquete impermeable y la capa drenante recomendados.

Tabla 5-6: Especificaciones para el paquete impermeable y la capa drenante

	Recomendado	Alternativa recomendada
espesor sub-base o fundación (m)	0.20	0.20
k arcilla natural o equivalente (cm/s)	$\leq 1 \times 10^{-7}$	$\leq 1 \times 10^{-5}$
espesor paquete arcilloso impermeable (m)	$\geq 1,0$	$\geq 0,60 + 1.5\text{mm}$ geomembrana PEAD (o 0.8mm PVC)
capa drenaje (mm)	300	300
k grava (cm/s)	$\geq 1 \times 10^{-1}$	$\geq 1 \times 10^{-1}$
pendiente del dren longitudinal (%)	1,0	1,0
pendiente del dren transversal (%)	3,0	3,0
diámetro tubería dren PEAD (mm)	≥ 150	≥ 150
distancia entre drenes (m)	10 a 20	10 a 20

5.5.5.2 Especificaciones para los sistemas de tratamiento de lixiviados y disposición final

Para diseñar adecuadamente el tratamiento se debe contar con una caracterización propia del lixiviado (por ejemplo de un sitio de disposición final de la misma localidad) o referencias de caracterización provenientes de otros rellenos con similares características. Si no se tiene una caracterización propia del lixiviado, se recomienda tomar los valores presentados en la **Tabla 5-7**.

Tabla 5-7: Composición de referencia del lixiviado

Parámetro	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	pH	N-NH ₄ (mgN/L)	N-NKT (mgN/L)	PO ₄ ³⁻ (mgP/L)	Cr total (mgCr/L)
Montevideo [18]	450*- 5.000	5.000- 10.000	350- 1.400	7,5- 8,5	2.000- 4.000		15-35	0,2-11
Maldonado**	1.900	4.000	300					
Tchobanoglous [9]	2.000- 30.000	3.000- 45.000	200- 2.000	5,3- 8,5	10-800	10-800	1-70	
Honduras [10]	2.000- 60.000	3.000- 90.000	250- 55.000	5,0 - 8,5	5-200			0-5
Cuba [21]	776-902	1.188- 2.011	341-629	7,93- 8,10	73-146		9-69	0,12-0,31
México (acetogénesis) [20]	6.000- 60.000	4.000- 40.000		4,5- 7,5				
México (metanogénesis) [20]	500- 4.500	20-550		7,59, 0				
Norte América [27] edad 0 a 5 años	10.000- 25.000	15.000- 40.000	10.000- 25.000	3,0- 6,0	500- 1.500	1.000- 3.000	100-300	
Norte América [27] edad 5 a 10 años	1.000- 4.000	10.000- 20.000	5.000- 10.000	6,0- 7,0	300-500	75-300	10-100	
Norte América [27] edad 10 a 15 años	50-1.000	1.000- 5.000	2.000- 5.000	7,0- 7,5	50-200	75-300	-	

Norte América [27] edad >20 años	<50	<1000	<1000	7,5	<30	<50	<10	
Brasil [27]	20 – 8.600	190 – 22.300	5-700	7,2- 8,6	0,4-1.800		0,1-15	0,003-0,5
Composición recomendada	5.000	10.000	1.000	6,0	400	400	30	2

(*) Valor registrado en las usinas 6-7 clausuradas en 2002.

(**)Valores promedios a partir de datos suministrados por la IdeMaldonado

El sistema de tratamiento de lixiviados tiene el objetivo principal de reducir la carga contaminante del líquido para que este pueda tener una disposición final adecuada minimizando los impactos ambientales.

Las alternativas de tratamiento de lixiviado a evaluar son:

- Planta de tratamiento de lixiviado (PTL) in situ
- Plantas de tratamiento de efluentes (PTE) cloacales

5.5.5.3 Tratamiento in situ

El tratamiento in situ refiere al caso en el que el sistema de tratamiento del lixiviado se construye y opera en el mismo predio donde se ubica el relleno sanitario.

El diseño del sistema de tratamiento de lixiviados debe considerar:

- a) composición esperada del lixiviado
- b) tipo de disposición final a realizar
- c) disponibilidad de área
- d) disponibilidad de personal con capacidad para la operación
- e) topografía del terreno
- f) gestión del lodo generado en el tratamiento

La disposición final del lixiviado tratado puede ser:

- Vertido a la red de saneamiento (lo cual puede resultar costoso si el sitio está ubicado lejos del área urbana),
- Aplicación a terreno,
- Vertido en un curso de agua, o
- Recirculación (regado del relleno).

Los sistemas de tratamiento del lixiviado comúnmente utilizados no difieren conceptualmente de los utilizados en los sistemas de tratamiento de efluentes cloacales. Los mismos, en general, incluyen tres pasos, el primer paso consiste en un pre-tratamiento, el segundo en un tratamiento biológico (anaerobio o aerobio) para la remoción principalmente de la carga orgánica y nutrientes, y el tercero en un tratamiento físico-químico para la remoción de nutrientes y metales pesados.

Para realizar la disposición final del lixiviado tratado, las características del mismo deben cumplir con los estándares planteados en el Decreto N°253/79 y tener como referencia los valores de la propuesta de actualización consolidada de COTAMA.

Pre-tratamiento

El pre tratamiento tiene por objetivo remover sólidos del lixiviado, por medio de desarenadores y sedimentadores, eventualmente puede incluir ajuste de pH. Es necesario que previo al tratamiento se diseñe un sistema de homogenización que permite absorber las variaciones del lixiviado tanto en carga como en caudal.

Procesos biológicos anaerobios

Los procesos anaerobios (ausencia de oxígeno) son muy eficientes para la remoción de materia orgánica de rápida degradación y presentan la ventaja de que generan menor cantidad de lodos que los procesos aerobios. Los procesos más simples operativamente son los de las lagunas anaerobias (aunque requieren de superficies de ocupación mayores), procesos más complejos son los sistemas de lecho fluidizado, filtros anaerobios y reactores de flujo ascendente-UASB (relativamente complejos de operar).

Procesos biológicos aerobios

Procesos aerobios van desde los más simples como son las lagunas facultativas o aireadas hasta los más complejos como los sistemas de lodos activados. Tienen por objetivo la remoción de la materia orgánica. Como desventaja presentan mayor costo de inversión, operación y mantenimiento que los sistemas anaerobios. En muchos casos se los usa como tratamiento posterior al tratamiento anaerobio.

Procesos físico-químicos

Estos procesos se utilizan principalmente para el ajuste de color, remoción de nutrientes, sólidos suspendidos y de metales.

Se recomienda que el sistema de tratamiento de lixiviados cuente al menos con las siguientes etapas:

- a) Pre-tratamiento: etapa homogenización de caudal y carga + remoción de sólidos
- b) Etapa anaerobia (reactores de flujo ascendente, lagunas, otro)
- c) Etapa aerobia (lodos activados, lagunas, otro)
- d) Físico químico (remoción de nutrientes y metales si corresponde)

A la hora de seleccionar predios se debe considerar el área requerida para el sistema de tratamiento.

La **Tabla 5-8** y la **Tabla 5-9** proponen una combinación de unidades de tratamiento para alcanzar las eficiencias necesarias para el cumplimiento de los estándares de vertido en términos de DBO₅ de acuerdo a la caracterización presentada en la **Tabla 5-7**. Dependiendo de la caracterización del lixiviado a tratar es posible que sea necesario incorporar un tratamiento físico químico para la remoción de metales.

Las plantas de tratamiento compuestas por lagunas tienen la ventaja de necesitar un mantenimiento sencillo por lo que los operadores no son especializados, presenta bajos costos de operación y mantenimiento. La desventaja de estos sistemas es que tienen elevados requerimientos de área.

Por otro lado, en las plantas de tratamiento compactas, si bien las necesidades de área son mucho menores (del orden de la tercera parte [25]), requieren de personal especializado para su operación y presentan mayores costos de operación y mantenimiento.

Tabla 5-8: Eficiencia en la remoción de DBO₅ con lagunas en serie [23]

Tratamiento	Eficiencia en remoción de DBO ₅ (%)	Eficiencia acumulada en remoción de DBO ₅ (%)
Pre tratamiento	30	30
Laguna anaerobia N° 1	45	62
Laguna anaerobia N° 2	45	79
Laguna aerobia	65	93
Laguna facultativa	65	98

Tabla 5-9: Eficiencia en la remoción de DBO₅ con sistema compacto

Tratamiento	Eficiencia en remoción de DBO ₅ (%)	Eficiencia acumulada en remoción de DBO ₅ (%)
Pre tratamiento	30	30
UASB	75	83
Lodo activado + sedimentador	85	97

La **Tabla 5-10** presenta la recomendación del tipo de tratamiento por tamaño de relleno sanitario, se destacan como ventajas la robustez de los sistemas de tratamiento por lagunas, la menor necesidad de mantenimiento y mano de obra no calificada. La desventaja principal del sistema de tratamiento por lagunas es que para ser eficientes requieren tiempos de retención hidráulica altos, lo que tiene asociado grandes requerimientos de área.

Tabla 5-10: Recomendación de tipo de tratamiento por tamaño de relleno sanitario

Tratamiento	Relleno sanitario pequeño (16 a 40 ton/día)	Relleno sanitario mediano (40 a 300 ton/día)	Relleno sanitario grande (>300 ton/día)
Lagunas en serie	X	X	
Sistema compacto		O	X

X=recomendado, O=deseable

5.5.5.4 Tratamiento en plantas de tratamiento de efluentes (PTE) cloacales

Como fuera presentado en el capítulo 3 se recomienda considerar como criterio de aptitud para la localización de un relleno la existencia en las cercanías de una PTE cloacales.

La incidencia del caudal y carga adicional al tratar los lixiviados en una PTE cloacales es muy baja y justifica la necesidad de realizar un análisis comparativo de los costos de conducción del lixiviado desde el relleno a la planta de PTE cloacales con los costos asociados a la existencia de una PTL in situ.

5.5.6 Gestión del biogás

El biogás es generado por la descomposición de la materia orgánica presente en los residuos depositados en el relleno.

La gestión del biogás (principalmente compuesto por metano - CH₄ y dióxido de carbono - CO₂) es imprescindible para minimizar las emisiones de gases efecto invernadero y prevenir riesgos de incendio o explosiones que pueden causar daños al personal, a la población o la infraestructura del relleno.

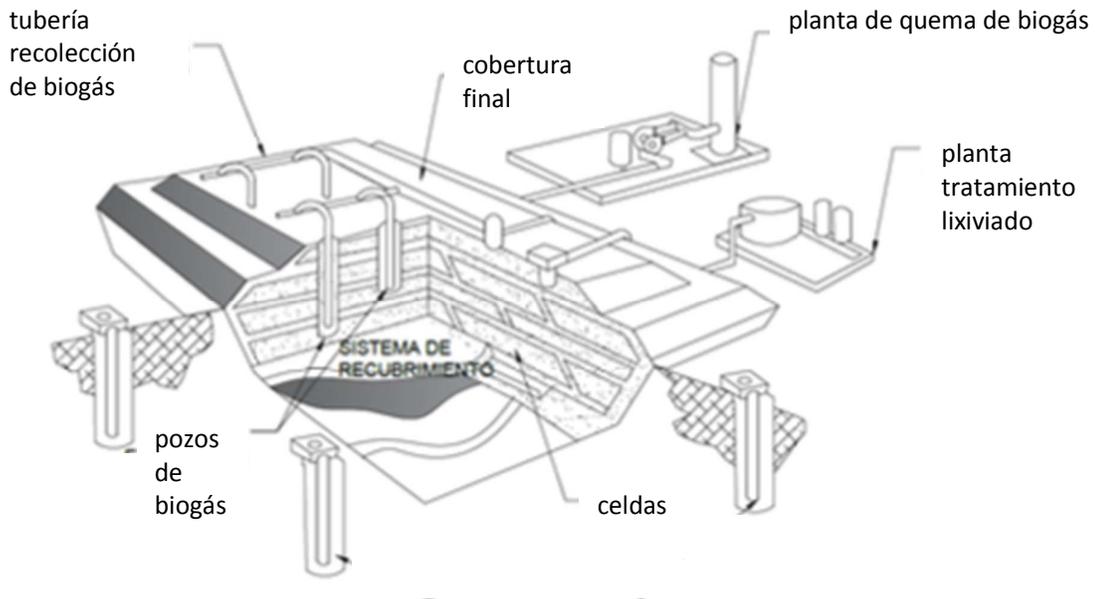
5.5.6.1 Producción

Para la estimación de la producción de biogás se han desarrollado varios modelos, en general basados en la ecuación de decaimiento con distintos factores de ajuste. En el anexo 9.6 se presenta el modelo recomendado.

5.5.6.2 Captación

Los sistemas de control de biogás se clasifican en activos y pasivos. Los sistemas activos, mediante la generación de vacío inducen el flujo del biogás hacia fuera del relleno, la **Figura 5-14** presenta un esquema del sistema de control activo.

Figura 5-14: Esquema de sistema de control activo [19]



Por otro lado, los sistemas pasivos aprovechan la presión existente dentro del relleno para evacuar el gas.

En los sistemas activos, cuando se está diseñando el relleno, los pozos de extracción se suelen colocar a distancias estimadas y luego mediante el ajuste del caudal de succión de gas se regula el radio de influencia del dren. Para pozos verticales, las distancias comúnmente utilizadas son entre 30 y 60m [10]. Los pozos son ubicados formando triángulos equiláteros, en cada vértice un pozo y la distancia entre pozos igual al radio de influencia.

Los tipos más comunes de pozos son :

- pozo de gas vertical. Consiste en un pozo que contiene una tubería que tiene perforaciones. La tubería está rodeada por un relleno de agregado grueso;
- pozos horizontales de gas. Consiste en tuberías perforadas colocadas horizontalmente en trincheras colocadas en el residuo o dentro del sistema de cobertura final. La tubería está rodeada por un relleno de agregado grueso;
- tipos híbridos.

En el diseño de los pozos de gas se debe incluir una tolerancia para el asentamiento de los residuos dentro del relleno sanitario, para lo que debe dejarse espacio suficiente entre el fondo del pozo y el revestimiento del relleno para reducir el riesgo de dañar el mismo.

Los pozos de extracción pueden construirse alternativamente durante el llenado del relleno o una vez finalizado el relleno.

Las especificaciones a considerar en el diseño de pozos verticales de gas incluyen [3]:

- diámetro mínimo de la tubería del pozo de 110 mm;
- sellar la parte superior del pozo de gas desde la superficie del suelo hasta una profundidad de al menos 3 m con bentonita;
- las tuberías deben estar rodeadas por agregados grueso bien redondeado de 4-6 veces el ancho de las ranuras (tamaño agregado de 12-30 mm);
- la mejor configuración de las ranuras son horizontales, es decir, en ángulo recto con respecto al eje del tubo, esto aumenta la resistencia al colapso del tubo

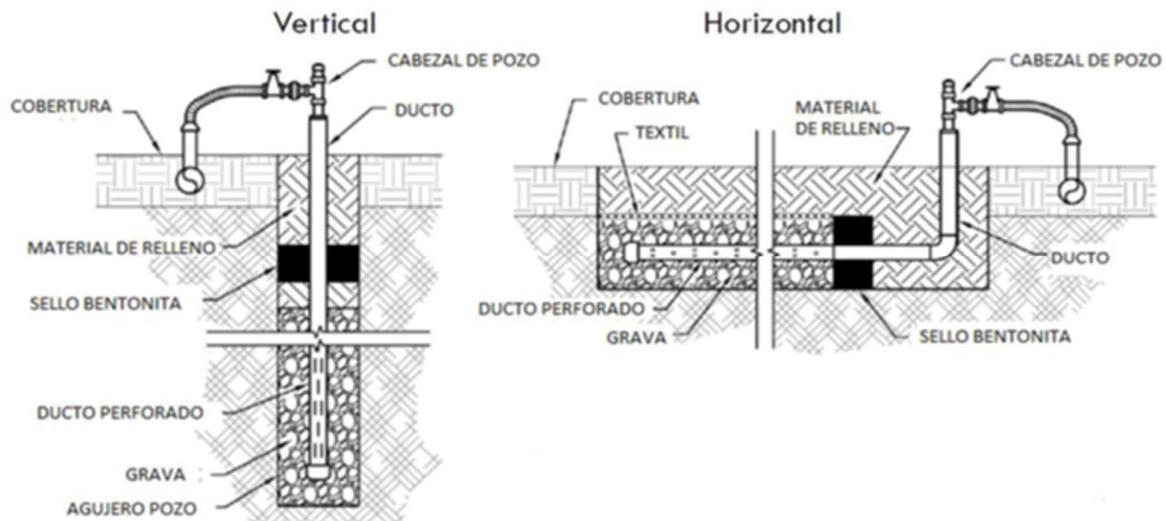
El cabezal del pozo es fijado al pozo para la extracción del biogás y conectado a la red de extracción con materiales flexibles por la existencia de asentamientos en el relleno. En el cabezal del pozo se colocan los reguladores de caudal, bombas neumáticas de extracción de lixiviados y equipos para monitorear la calidad del gas y las presiones de succión.

La red de extracción consiste en una red de tuberías conectadas a cada pozo, en general de polietileno o polipropileno. Las tuberías deben ser resistentes al lixiviado, el condensado y el gas. Además mecánicamente resistentes a los movimientos por posibles asentamientos. La red debe contar con válvulas que permitan sectorizar la red.

Cuando el gas se enfría genera un condensado que puede ser corrosivo y además contener compuestos orgánicos volátiles. El condensado puede obstruir el pasaje del gas, por lo cual es necesario implementar su drenaje.

La **Figura 5-15** presenta las características típicas de pozos verticales y horizontales.

Figura 5-15: Sección típica de un pozo de extracción [19]



5.5.6.3 Venteo, quema o aprovechamiento energético.

El aprovechamiento del gas depende de la calidad del biogás, la cantidad a extraer y los costos de la gestión.

Un aprovechamiento posible es la generación de energía a partir del biogás. Las máquinas para generar energía pueden ser turbinas o motores, en general estas máquinas requieren como mínimo de un 35% de metano. Las emisiones de estas máquinas también deben ser monitoreadas y cumplir con los estándares de GESTA – AIRE.

Otras opciones consisten en utilizar el gas como combustible en:

- a) Calderas
- b) Fabricación de cemento
- c) Calefacción residencial y de invernaderos
- d) Combustible de vehículos.

Para analizar la pre factibilidad se debe considerar que el volumen mínimo de residuos que justifica una instalación para quema es de unas 100 ton/día, y para generación de energía eléctrica es de unas 300 ton/día, considerando el precio de la energía eléctrica no menor a 55-60 U\$S/MWh [12].

El venteo de gas se realiza cuando la escala del relleno dificulta económicamente la quema o aprovechamiento energético y en casos en que la calidad del gas es muy baja. Para realizar el venteo se construyen chimeneas o trincheras de grava, la construcción de las chimeneas es similar a la de los pozos de extracción.

Para la operación de una antorcha para la quema del metano se necesita una concentración en volumen de por lo menos el 20% de metano. La temperatura de quema recomendada es de 1000 a 1200°C con un tiempo de retención de 0,3 a 0,6 segundos [4].

La emisión producto de la combustión del gas debe ser monitoreada y cumplir con los estándares propuestos por GESTA –AIRE.

5.5.6.4 Relleno semi-aeróbico

La disposición de residuos en rellenos semi-aeróbicos, conocida como el método de Fukuoka (ver Anexo 9.1.1) es una alternativa al relleno sanitario clásico (con degradación anaerobia de los residuos). Dicho método logra una digestión de los residuos de manera semi-aerobia, a través del ingreso de aire por el sistema de captación de lixiviados, el cual es construido con mayores diámetros de tubería.

Las ventajas que se destacan del método de Fukuoka son la generación de menor cantidad de metano, dado que el componente principal del gas es el dióxido de carbono, la estabilización más rápida de los residuos mitigan las emisiones de gases efecto invernadero de la disposición final y se facilitan los procesos de tratamiento de lixiviado.

5.5.7 Gestión del agua superficial

En un relleno sanitario es necesaria la gestión del agua pluvial, no solo por las posibles afectaciones al curso de agua existente aguas abajo, sino también por la incidencia en la operación del relleno.

Adicionalmente, en general la operación de un relleno sanitario tiene asociado grandes movimientos de tierra donde los materiales movidos tienen el potencial de generar sedimentos los días de lluvia.

Es por ello que es necesario el diseño de un sistema de aguas pluviales que cumpla las siguientes funciones críticas:

- a) Garantizar que las operaciones del relleno no se vean comprometidas por el drenaje superficial.
- b) Minimizar la generación de lixiviados evitando que las aguas superficiales ingresen en la masa de residuos.
- c) Evitar la contaminación del agua superficial por contacto con el lixiviado.
- d) Minimizar el arrastre de sólido a través de:
 - i. minimizar las áreas sin vegetación,
 - ii. reducir las velocidades de escurrimiento,
 - iii. proteger las áreas con almacenamiento de materiales para minimizar el arrastre y
 - iv. realizar lavado de las ruedas de los camiones para evitar arrastre de sólidos.

Los elementos del sistema de gestión de pluviales desde el punto de descarga hacia aguas arriba son [4]:

- a) Lagunas de sedimentación/almacenamiento de aguas pluviales

- b) Sistemas de drenaje
- c) Drenaje del área activa
- d) Drenaje de áreas clausuradas.

5.5.7.1 Lagunas sedimentación/almacenamiento de aguas pluviales

El principal objetivo del diseño de lagunas de retención es el de sedimentar los sólidos arrastrados por el escurrimiento pluvial, evitando su transporte fuera del predio. También se pueden utilizar para almacenar agua para distintos usos, como ser el riego de espacios verdes del predio.

Durante la etapa de operación deben realizarse monitoreos para controlar la calidad de la descarga (ver 7.7.1).

5.5.7.2 Sistemas drenaje

Los sistemas de drenaje del escurrimiento superficial están compuestos por zanjas de materiales naturales y canales revestidos que forman el drenaje externo al área de disposición de residuos. Se recomiendan estructuras de canal abierto para drenaje de forma tal de optimizar la capacidad de flujo y reducir el riesgo de obstrucción.

También componen el sistema de drenaje las conducciones por tuberías, las alcantarillas de caminos, los sistemas de bombeo, etc. todos ellos semipermanentes o permanentes. Estos sistemas son diseñados para eventos con período de retorno del orden de la vida útil del relleno. Bajo eventos de tormenta más severos dichos sistemas de drenaje puedan sufrir roturas y seguramente requieran ser reparados.

Para el cálculo de caudal de agua superficial a conducir se recomienda el método Racional presentado en el Anexo 9.7.

Se debe realizar un mantenimiento continuo y la limpieza del sistema para el adecuado funcionamiento de esta red de canales .

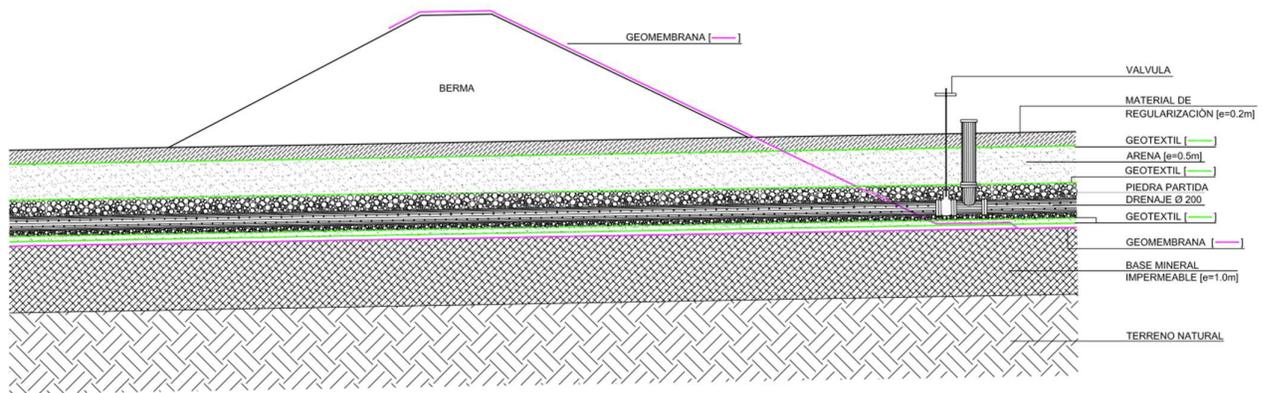
5.5.7.3 Drenaje del área activa

El drenaje en el área activa donde se están disponiendo los residuos, debe ser manejado cuidadosamente. Como regla general cualquier lluvia o desagüe en contacto con los residuos debe tratarse como lixiviado, por lo que claramente minimizar este volumen de agua es un factor clave para el diseño y las operaciones.

El llenado de cada fase del relleno se realiza dividiendo la misma en aproximadamente 3 celdas operativas, separándolas mediante bermas de 1,0 m de altura.

- a) Dichos terraplenes serán una barrera física para la contención de los pluviales que escurren aguas arriba de la zona en operación, para su posterior bombeo, hacia los canales pluviales perimetrales.
- b) Inmediatamente aguas arriba del terraplén se coloca en la tubería de drenaje de lixiviado una válvula de cierre, (para evitar que el agua pluvial limpia se “mezcle” con la de lixiviado), el vástago de la válvula será extraído luego que se avance a la siguiente celda, permaneciendo el cuerpo de la misma debajo de los residuos.
- c) A su vez se “forra” con geomembrana el terraplén intermedio de manera de contener el escurrimiento pluvial limpio. El detalle se observa en la **Figura 5-16**.
- d) Para la evacuación del agua pluvial limpia, se colocara en la tubería de drenaje una te, en la cual se conecta una tubería de 200 mm de diámetro, para el descenso de la bomba. Dicha bomba, corresponde a una bomba sumergible de achique. Cuando el relleno avance hacia la siguiente celda se utilizará un tapón para la clausura de la te.

Figura 5-16: Detalle de la berma



5.5.7.4 Drenaje de áreas clausuradas

El drenaje de áreas clausuradas se implementa progresivamente a medida que el relleno es tapado con la cobertura final y rehabilitado. Este sistema requiere de mantenimientos típicos de limpieza y reparación por los asentamientos que sufren las celdas clausuradas.

También debe preverse la gestión de las aguas superficiales que escurren por las áreas pavimentadas y las vías de acceso y derivarlas hacia el estanque o drenaje de pluviales.

5.6 INFRAESTRUCTURA CONEXA

5.6.1 Acceso al predio y cerco perimetral

El acceso al predio donde se emplaza el relleno sanitario debe ser restringido al público en general. Se recomienda contar con una garita de vigilancia y de ser necesario un sistema de video vigilancia.

Para restringir el acceso al predio se debe tener una barrera física alrededor del perímetro del sitio (se recomienda alambrado olímpico con portones de cierre con candado).

Los cercados perimetrales deben evitar el uso de alambre de púas que si bien es eficiente para atrapar la basura, también hacen que sea difícil de retirar y limpiar.

5.6.2 Iluminación

Teniendo en consideración la escala de proyecto y los turnos de trabajo, Se debe proporcionar iluminación en aquellas áreas en funcionamiento después de la caída del sol. El proyecto debe incluir como mínimo iluminación en:

- El acceso desde la vía pública al área de recepción del sitio
- Caminos de acceso a servicios
- Todas las instalaciones del sitio que requieran o pueden requerir mantenimiento fuera de las horas diurnas de trabajo, p.e. balanza, limpiador de ruedas, área para descarga de residuos de particulares, etc.
- Perímetro del sitio si no cuenta con iluminación procedente de la vía pública .

5.6.3 Cartelería indicativa

El punto de acceso al predio, así como la vía pública por la cual se llega al relleno sanitario debe tener cartelería que indique claramente los residuos autorizados y no autorizados, el horario de funcionamiento y los teléfonos de contacto.

La cerca perimetral debe tener señales para identificar el sitio, advertir a los intrusos que no está permitido el acceso y un número de teléfono de emergencia.

5.6.4 Ingreso al relleno

Todos los ingresos y salidas de camiones deben ser pesados y se debe realizar el registro del peso en *forma digital*. Debe preverse el equipamiento para realizar dichos registros como ser balanza, computadoras y sistemas de respaldo de los datos.

El control y análisis de las cantidades de residuos ingresados permite planificar y tomar medidas que optimicen el servicio, el uso de la infraestructura y la maquinaria. En la fase operativa, el análisis de la información registrada permite evaluar el avance del relleno, la disponibilidad de vida útil remanente y planificar cuando será necesaria la construcción de nuevas celdas.

5.6.4.1 Balanza

La balanza en el relleno, debe estar ubicada en la zona de ingreso al relleno, pero lo suficientemente alejada de la vía pública de acceso para no generar embotellamiento. La circulación de acceso a la balanza deberá considerar posibles esperas y colas (ver **Figura 5-10**). Si esto no es posible se deberá proyectar algún elemento para minimizar el impacto sobre el tránsito.

Para la selección de la balanza se debe considerar la capacidad de pesaje y la longitud requerida. Se recomienda que tenga una capacidad de 60 toneladas y un mínimo de 15m de largo.

El diseño de la zona de balanza debe facilitar la inspección visual directa, o con cámara de las cajas de camiones abiertos, así como la toma de muestra si es necesario.

Se debe realizar el pesaje de los vehículos tanto al ingreso como a la salida y guardar cada registro del peso en formato digital. Es común que la balanza tenga asociado un software para el almacenamiento de datos.

Se recomienda que anualmente se le realicen calibraciones con empresas o instituciones especializadas, que asegure la confiabilidad de las pesadas a realizar.

5.6.4.2 Zona de descarga de residuos de vehículos de pequeño porte

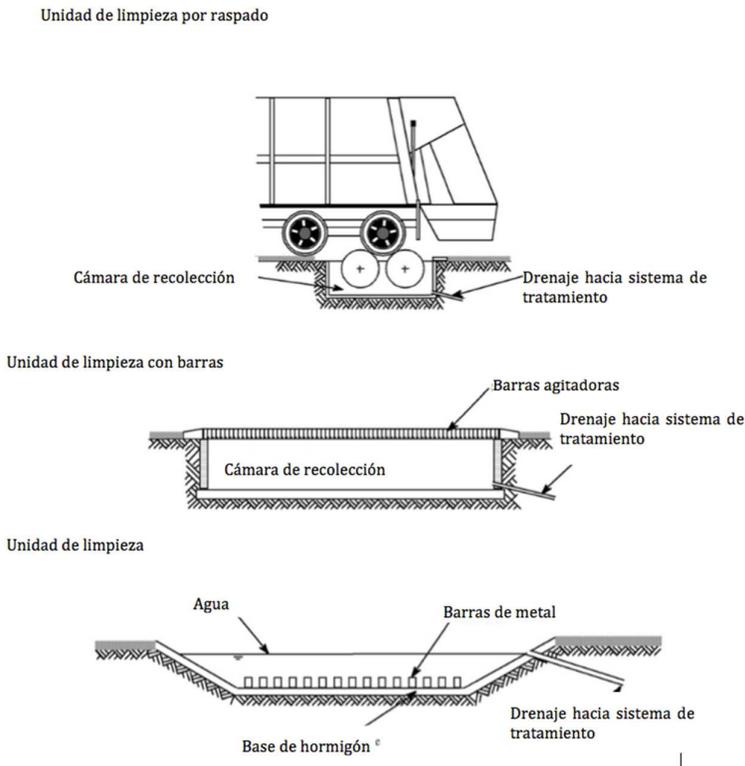
La zona de descarga de residuos de vehículos de pequeño porte debe ser accesible para quienes transportan los residuos hasta el sitio. Cuando los residuos cumplen con las condiciones de ingreso los mismos deben ser descargados en un área específica cercana al ingreso. Luego serán transportados para su disposición final con la maquinaria del relleno.

5.6.4.3 Lavadero de ruedas

Es conveniente que el relleno cuente con un lavadero de ruedas para impedir que se lleve a la vía pública barro y residuos. Si el sistema de lavado utiliza agua se debe prever tanto el suministro del agua como la conducción del efluente hacia la planta de tratamiento de lixiviados.

La **Figura 5-17** muestra distintos sistemas utilizados para el lavado de ruedas.

Figura 5-17: Sistema de lavado de ruedas [3]



5.6.5 Caminería interna

La caminería interna debe considerar la caminería desde la vía pública hasta el predio, la caminería permanente dentro del predio y la caminería temporaria de acceso al frente de trabajo. Toda la caminería debe permitir la circulación en cualquier condición meteorológica

Si la vía pública es pavimentada es recomendable que la caminería desde la misma hasta la garita de ingreso o la balanza también lo sea. Desde este punto la caminería permanente debe extenderse hasta lo más cerca posible del frente de trabajo.

Además se recomienda que exista caminería permanente en todo el perímetro del predio, la misma permite un mejor mantenimiento del sitio, mejora el tráfico interno y permite la circulación en un sólo sentido. En general se construye sobre las bermas perimetrales de las celdas, reforzando el material del talud con material con capacidad soporte y con pendiente hacia afuera evitando el ingreso de agua a la celda.

La **Tabla 5-11** presenta recomendaciones de tipo de caminería permanente de acuerdo al tipo de relleno.

La pendiente de la caminería permanente se recomienda menor a 5% y el ancho mínimo de 7.5- 8.0m para circulación en ambos sentidos, con un paquete estructural de 30 cm de tosca CBR 80 % compactado hasta densidad equivalente al 90 % del Proctor Modificado.

El mantenimiento de estos caminos debe ser tal que se asegure su transitabilidad ante cualquier condición climática incluidas intensas precipitaciones. El adecuado drenaje de la caminería garantiza la circulación en días de lluvia, es por ello que el diseño de la caminería debe considerar el escurrimiento de pluviales con pendiente hacia uno de los lados del camino.

Tabla 5-11: Tipo de caminería permanente recomendada

Tamaño de relleno	Tipo de caminería permanente
Pequeño de 16 a 40 ton/día	Tosca compactado
Mediano de 40 a 300 ton/día	Tosca compactada
Grande > 300 ton/día	Pavimentado

La caminería temporal, permite el acceso al frente de trabajo, la misma se construye con el mismo material de cobertura diaria cubierto con arena, piedra partida o escombros de pequeño tamaño, el cual a partir del tránsito de camiones se va compactando. Se recomienda un espesor entre 30 – 50 cm compactado en capas de 15 - 20cm.

Se deben incluir señales de tránsito (PARE, dirección de tránsito, velocidad máxima permitida, etc.) y sitios de estacionamiento para particulares, personal, etc.

5.6.6 Barrera vegetal y zonas de amortiguamiento

El perímetro del relleno deberá contar con una barrera vegetal integrada por combinaciones de especies arbustivas y árboles, para mitigar el ruido del tráfico y de la maquinaria, reducir el impacto visual, retener el polvo y contribuir a la reducción de posibles olores.

Características de la barrera vegetal perimetral:

- Ancho real: mínimo 15 m
- Alto de la barrera: mínimo 6m
- Densidad/ porosidad óptica: 50 %
- Configuración: hilera simple, doble hilera desfasada
- Geometría de la barrera: Alrededor de todo el perímetro
- Tipo de follaje: en Uruguay es bastante común el uso de casuarinas eucaliptus para las barreras vegetales por su resistencia y fácil adaptación.

Dentro del predio, además se contará con una zona de amortiguamiento con el objetivo de distanciar la zona de disposición de residuos de su perímetro para minimizar la afectación al entorno y también para oficiar de barrera corta fuego.

Características de la zona de amortiguación:

- Ancho real: mínimo 20 m
- Superficie: pavimentada o tosca

5.6.7 Oficinas y vestuario para el personal

Se recomienda que el relleno cuente con oficinas equipadas con agua, energía eléctrica, teléfonos, aire acondicionado para las tareas del personal administrativo y técnico que allí trabaje.

Además se debe considerar vestuarios y baños para el personal.

5.6.8 Taller y depósito de máquinas y herramientas

Como parte de la infraestructura se contará con un área o local para el depósito de la maquinaria, herramientas y equipos, que además permita realizar tareas de mantenimiento.

5.6.9 Almacenamiento de combustible

Además se contará con espacio adecuado para el almacenamiento de combustible de acuerdo a las cantidades mensuales previstas, actuales o futuras. El mismo deberá contar con un sistema de contención secundaria para la contención y captación de posibles derrames.

5.6.10 Instalación del sistema de incendios

Se debe elaborar un plan de emergencias contra incendios e instalar extintores portátiles y tener operativo un extintor en el frente de trabajo.

El plan debe contemplar el hecho que en los rellenos sanitarios la manera de controlar el fuego es apagándolo con tierra o residuos de manera de ahogarlo. El agua se usa solo como cortafuego o para enfriar las máquinas que están trabajando. Además considerar que una de las causas más comunes de los incendios superficiales es que se fume en el frente de trabajo, por lo cual esto tiene que estar prohibido.

La instalación de un sistema de combate de incendios para los edificios del relleno debe diseñarse en cumplimiento de la normativa nacional de Bomberos, Decreto N°150/2016.

5.7 SÍNTESIS DE LA INFRAESTRUCTURA NECESARIA POR TAMAÑO DE RELLENO

Se presenta la infraestructura recomendada por tamaño de relleno sanitario para realizar la operación del mismo:

Tabla 5-12: Infraestructura recomendada por tamaño de relleno sanitario

Infraestructura	Relleno pequeño 16 a 40 ton/día	Relleno mediano 40 a 300 ton/día	Relleno grande >300 ton/día)
Equipo de distribución de residuos y material de cobertura	X	X	X
Equipo compactador de residuos		O	X
Construcción paquete impermeable material natural	X	X	X
Geomembrana		O	X
Captación y tratamiento de lixiviado	X	X	X
Captación de biogás	X	X	X
Venteo de biogás	X		
Quema de biogás	O	X	
Aprovechamiento energético biogás			X
Gestión del agua superficial	X	X	X
Cercado perimetral	X	X	X
Iluminación	X	X	X
Balanza	O	X	X
Lavado de ruedas		O	X
Caminería interna	O	X	X

Infraestructura	Relleno pequeño 16 a 40 ton/día	Relleno mediano 40 a 300 ton/día	Relleno grande >300 ton/día)
Barrera vegetal	O	X	X
Zona de amortiguación	O	O	X
Oficinas y vestuarios para personal	O	X	X
Taller mecánico		O	X
Sistema combate incendios	X	X	X
Cobertura diaria	X	X	X

O deseable, X recomendable, vacío no necesario

5.8 INFRAESTRUCTURA DE CONTROL AMBIENTAL

Para la realización del control ambiental del relleno, tanto en la etapa de construcción, operación como de clausura, se debe evaluar el desempeño del relleno a través de distintos aspectos ambientales. Para ello se requiere de obras para:

- a) Control de aguas subterráneas
- b) Control de aguas superficiales
- c) Control de la descarga de lixiviados
- d) Control de gases, olores, vectores, aves, voladuras

En el capítulo 7 se plantea el plan de monitoreo ambiental, el cual define los parámetros, la frecuencia y los estándares con los que se evaluará el desempeño durante la operación.

En el capítulo construcción y clausura se plantea el plan de monitoreo ambiental de dichas etapas.

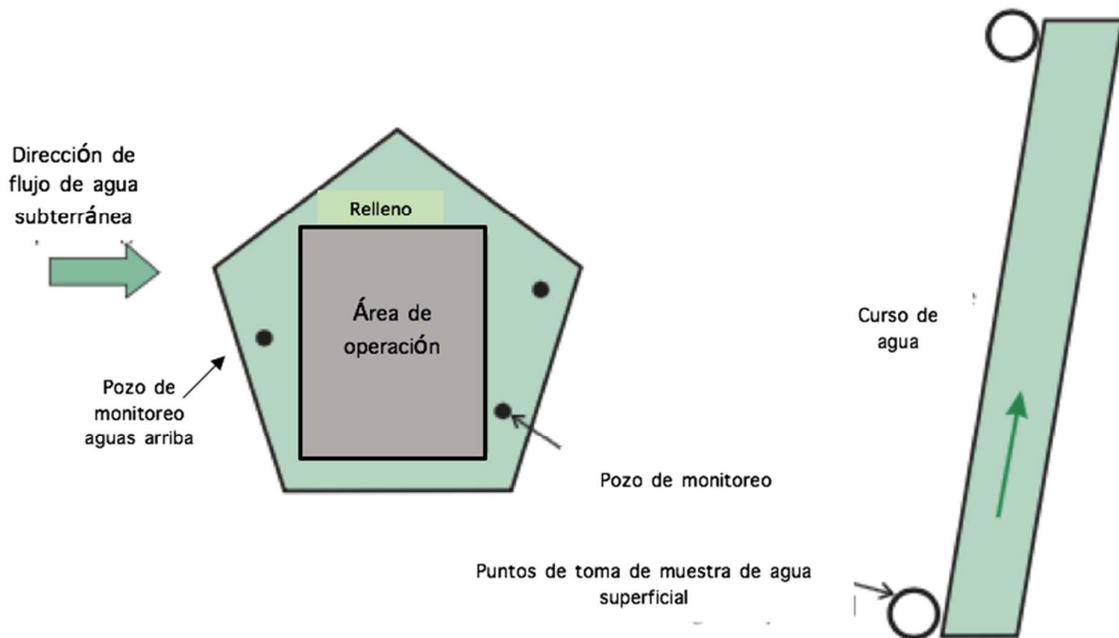
5.8.1 Control de aguas subterráneas

Un sistema de control de aguas subterráneas está conformado por perforaciones que constituyen la red de monitoreo, siendo el objetivo del monitoreo identificar posibles cambios en la calidad del agua subterránea.

Dicha red debe incluir al menos una perforación no afectada por el relleno sanitario, ubicada flujo arriba de éste, que sirva como “blanco” y dos perforaciones ubicadas flujo abajo, tal como lo ilustra la **Figura 5-18** [14]. Las perforaciones flujo arriba y flujo abajo deben ser realizadas sobre el mismo acuífero, por lo que la construcción de los pozos debe considerar la profundidad del nivel freático ubicando los filtros de manera de poder muestrear el acuífero de interés. Ver capítulo 6 por más detalles a considerar en la construcción de pozos de monitoreo.

La ubicación de los pozos de monitoreo aguas abajo debe ser lo más próxima posible al relleno. La ubicación exacta de las mismas surgirá del estudio hidrogeológico del sitio. Quien esté a cargo del estudio hidrogeológico diseñará los pozos y preparará los proyectos de pozos.

Figura 5-18: Ubicación pozos monitoreo (adaptado de [14])



5.8.2 Control de aguas superficiales

El control de las aguas superficiales principalmente refiere al control del contenido de sólidos en el agua pluvial y al control del curso de agua al cual escurren las pluviales y se descarga el lixiviado tratado.

Para el control del agua pluvial es necesario asegurarse de que todo el escurrimiento de estas sea a través de las estructuras apropiadas de control de sedimentos. Los controles de sedimentos incluyen, trampas de sedimentos y lagunas de sedimentación.

Para el control del curso de agua no se necesitan estructuras específicas.

5.8.3 Control de las descargas de lixiviado tratado

El control de la descarga de lixiviado tratado consiste en determinar el caudal y verificar si la calidad del lixiviado, una vez que ha sido tratado en la planta de tratamiento, cumple con las condiciones para ser vertido.

Para ello es necesario prever la construcción de una cámara de control, extracción de muestras y aforo previo al punto de vertido.

5.8.4 Control de gases, olores, vectores, aves, voladuras.

El monitoreo de gases, olores, vectores, aves y voladuras no requieren de obras específicas para su desarrollo.

6 CONSTRUCCIÓN

6.1 OBJETIVO

Este capítulo plantea las consideraciones a tener en cuenta a la hora de hacer seguimiento de la construcción de un nuevo relleno sanitario. Se proponen únicamente los controles que son específicos a la obra de un relleno sanitario, no obstante también deben considerarse otros controles típicos de cualquier obra civil.

Para dar comienzo a la etapa de construcción es necesario contar con el proyecto ejecutivo del relleno sanitario. El ingeniero director de obra designado por la Intendencia, será el responsable del seguimiento de la obra y de que la misma se desarrolle de acuerdo al proyecto ejecutivo.

Los controles específicos en la obra del relleno sanitario refieren a:

- preparación del terreno,
- impermeabilización de las celdas,
- sistema de drenaje,
- construcción de perforaciones o pozos para el monitoreo de agua subterránea.

6.2 CONTROLES DE CALIDAD A REALIZAR DURANTE LA OBRA

Los controles de calidad a realizar en la obra tienen por objetivo verificar que el relleno se construya de acuerdo al diseño y las especificaciones del proyecto. Para lograr este objetivo se recomienda elaborar un Plan de Aseguramiento de la Calidad de la construcción, el cual debe abordar los siguientes aspectos [1]:

- a) Finalidad del plan: el Plan debe establecer los procedimientos de prueba, inspección y verificación propuestos para demostrar que los materiales y las características constructivas en el relleno cumplen con los diseños y especificaciones aprobados.
- b) Prueba de materiales: el Plan debe especificar los lugares de muestreo, la frecuencia de los ensayos, los métodos de ensayo, los laboratorios, las acreditaciones, las especificaciones aplicables y las normas de calidad, la evaluación de los datos, los criterios de aceptación y rechazo y las medidas de contingencia en caso de fallo.
- c) Partes responsables: el Plan debe describir las funciones, responsabilidades y experiencia de las partes involucradas en la entrega de garantía de calidad de la construcción. Todas las partes deben tener calificaciones y experiencia apropiadas para sus funciones en el proyecto.
- d) Director de obra: se recomienda que el Gobierno Departamental designe a un ingeniero calificado y experimentado para el seguimiento de la calidad de la construcción. Debe realizar inspecciones in situ del trabajo y debe estar presente cuando se toman las muestras para las pruebas de materiales de construcción.
- e) Debe realizarse, al menos, la inspección del revestimiento de arcilla, las capas de drenaje, las capas geosintéticas, las capas de protección, las tuberías, las captaciones de gases, los atravesamientos de la tubería de lixiviados y de recolección de gas, y las instalaciones de monitoreo.
- f) Subcontratistas: los subcontratistas que instalen materiales geosintéticos deben tener calificaciones, experiencia y competencia en la instalación, costura y / o unión de dichos materiales. Los subcontratistas de perforaciones de monitoreo de agua subterránea deben tener experiencia para realizar este trabajo.

6.2.1 Controles de calidad de la impermeabilización de celdas

Los controles de calidad de la impermeabilización de la celda abarcan:

- Controles del material arcilloso y
- Controles en la colocación de la geomembrana

6.2.1.1 Controles de la impermeabilización con arcilla

Antes de comenzar la construcción, el contratista debe establecer el rango de densidades y contenido de humedad que dará al revestimiento de arcilla la conductividad hidráulica requerida. Mediante el ensayo de Proctor Modificado (AASHTO-180) se determinará en laboratorio la relación entre el contenido de humedad óptimo y la densidad del suelo compactado, y se determinará la conductividad hidráulica en esas condiciones.

El material utilizado para la impermeabilización de base, preferentemente procedente del propio sitio, o de un lugar cercano debe ser trabajado en forma adecuada. Este trabajo consiste en compactar el material a la humedad óptima en capas de no más de 30 cm para alcanzar la conductividad hidráulica buscada.

Cada capa debe quedar bien unida a la siguiente para evitar el desarrollo de caminos preferenciales para los líquidos.

Este material debe quedar con una superficie homogénea, con pendientes adecuadas, porque sobre el mismo se colocará la geomembrana. Se debe evitar la posibilidad de que se acumule agua entre el material y la geomembrana, pues esto puede ser causa de rotura de la misma.

Se recomienda minimizar el tiempo entre que se finaliza la construcción de la capa impermeable de arcilla y que la misma es cubierta con geomembrana. Si no es posible realizarlo inmediatamente se debe proteger temporalmente contra la luz solar y la erosión (con algún material plástico reutilizable). De lo contrario puede tener daños irreversibles por resquebrajamiento.

Durante la construcción, se realizarán las pruebas de campo para determinar la compactación alcanzada mediante ensayos en cada capa de 30cm según AASHTO T-191 para determinar la densidad. Con el dato de la densidad y la relación obtenida en laboratorio se conocerá la conductividad hidráulica alcanzada.

De acuerdo a [1] se recomienda tomar 12 muestras por cada hectárea y por cada capa de material.

Se debe controlar:

- a) el espesor del material impermeable mediante excavación
- b) la pendientes requeridas
- c) la compactación del mismo a través de la medición de la densidad de campo con equipos portátiles
- d) conductividad hidráulica tanto medida directamente en sitio como obtenida a partir de la densidad medida y la relación densidad-conductividad hidráulica obtenida en laboratorio. La conductividad hidráulica en campo se mide a través del ensayo de infiltrómetro de doble anillo (ASTM D5093).

6.2.1.2 Colocación de geomembrana

En primera instancia se debe verificar que la geomembrana cumpla con las especificaciones requeridas de acuerdo a lo planteado en la **Tabla 5-5**.

La colocación de geomembranas es una tarea compleja que debe ser realizada por empresas especializadas.

Se recomienda transportar la geomembrana en rollos embalados, como vienen de fábrica. El embalaje protege la geomembrana de los rayos UV, por lo que hay que conservar el embalaje hasta el momento de colocación sobre el terreno preparado.

De preferencia debe ser extendida sobre el terreno manualmente para evitar posibles daños por el uso de maquinaria. Mientras es colocada se deben utilizar pesas (bolsas de arena o similar) para la protección contra el viento.

Para realizar la unión o soldadura de la geomembrana siempre se debe superponer una parte con la otra. Existen los siguientes tipos de unión:

- a) Soldado por fusión
- b) Soldado por extrusión
- c) Soldadura química (solo para geomembranas de PVC, se aplica en frío)

Se deben remover todas las arrugas lo mayor posible antes de hacer la unión, así como todo material extraño como polvo, agua, aceite. La superposición de los paños debe ser al menos de 8 cm.

Cuando existan uniones en los taludes laterales estas deben ser paralelas a la pendiente y no perpendiculares. La calidad de las soldaduras de la geomembrana debe ser ensayada de acuerdo a la norma ASTM D4437.

No se recomienda realizar tareas de unión de geomembrana en días con temperaturas extremas (mayores de 40° C o menores de 0° C).

Figura 6-1: Tipos de soldaduras y pruebas de uniones [2]

Soldadura por fusión



Prueba de presión en soldadura por fusión



Soldadura por extrusión



Prueba de succión en soldadura por extrusión



Una vez colocada la geomembrana se deben hacer inspecciones visuales para identificar roturas, perforaciones o cualquier daño, los cuales deben ser reparadas usando material adicional soldado por fusión.

La **Figura 6-2** presenta la zanja de anclaje que debe realizarse en todos los bordes de la geomembrana para fijarla al terreno.

Figura 6-2: Zanja y relleno para el anclaje [2]



Si se coloca una capa de material drenante en toda la superficie, ésta oficia de protección para la geomembrana. Sin embargo, si se opta por drenes en forma de espina de pescado, debe colocarse una capa de protección que permita la circulación de personas y vehículos. En general se busca sea de tierra sin componentes filosos y se coloca en espesores de 15 a 20cm, para su colocación se recomienda [2]:

- Colocación en las horas más frescas del día
- Instalar en forma de dedos para controlar y minimizar arrugas
- Instalar hacia arriba en las pendientes
- Instalar con equipo ligero como buldócer de bajo peso
- Se recomienda supervisión continua por el profesional de aseguramiento de calidad durante la construcción

Figura 6-3: Distribución en dedos del material protector [2]



Luego se procede a colocar el sistema de drenaje.

Se debe tener especial cuidado en los puntos donde la tubería de recolección de lixiviado atraviesa la geomembrana. Esto debe hacerse utilizando una unión especial que viene prevista con la geomembrana.

6.2.2 Control del sistema de drenaje

Para las capas de drenaje de grava, el Plan de Aseguramiento de la Calidad de la Construcción debe abordar los siguientes requisitos [1]:

- a) Para los materiales de drenaje granular se deben realizar ensayos de campo que aseguren que la grava cumple las siguientes características:
 - i. ser dura, fuerte, duradera y limpia
 - ii. conductividad hidráulica saturada superior a 1×10^{-1} cm/s
 - iii. tamaño de partícula relativamente uniforme, con un tamaño nominal superior a 20 milímetros y un tamaño máximo de 40 milímetros,

Se recomienda hacer al menos una prueba por cada 2500 toneladas de material colocado.

El muestreo debe ser supervisado por el director de obra.

- b) Los materiales de drenaje granular deben colocarse de manera que evite dañar cualquier material de revestimiento geosintético subyacente.
- c) Se debe minimizar la entrada de partículas de tierra y roca en la capa de drenaje, ya que pueden aumentar el riesgo de obstrucción en la capa de drenaje.
- d) Las tuberías deben colocarse sobre un lecho uniforme de material, estar adecuadamente acodadas y protegidas con material (por lo menos 300 milímetros sobre la corona de la tubería), y debidamente unidas, alineadas y espaciadas.
- e) Todo el personal del sitio debe evitar conducir maquinaria pesada sobre la capa de drenaje después de la colocación.

6.2.3 Control de las perforaciones para el monitoreo de agua subterránea

Para el monitoreo de la calidad del agua subterránea es necesaria la construcción de al menos tres perforaciones, una aguas arriba del relleno y dos aguas abajo (para los rellenos pequeños un pozo aguas abajo). La ubicación de los mismos surgirá del estudio hidrogeológico del sitio. Quien esté a cargo del estudio hidrogeológico diseñará los pozos y preparará los proyectos de pozos.

Dependiendo del tipo de acuífero de la zona, se definirá la profundidad de los pozos, el diámetro, el entubamiento, la zona de filtros y el sellado de los mismos. Todas estas características forman parte del proyecto de pozo.

6.2.4 Otros controles

En toda obra civil se deben realizar otros controles de rutina como ser:

- a) Calidad de los materiales suministrados
- b) Calidad del hormigón y las armaduras
- c) Desarrollo de los edificios
- d) Seguridad del personal
- e) Gestión de las emisiones de la obra (residuos, efluentes, emisión de material particulado, etc.)

7 OPERACIÓN

7.1 OBJETIVO

Este capítulo tiene por objetivo presentar los principales aspectos a ser considerados en la operación de un relleno sanitario tipo.

La disposición segura y bien organizada de los residuos es una de las características principales que distingue una operación controlada en un relleno sanitario de un vertedero a cielo abierto. Incluso hasta el relleno mejor diseñado y preparado tendrá muchos problemas ambientales si se opera mal. Por el contrario, la operación bien realizada puede compensar debilidades en la ubicación del sitio y del diseño (Flintoff 1976).

El período operativo de un relleno es la etapa más larga en la vida de un sitio. Durante este tiempo, se requerirá la atención de las jerarquías Departamentales en varias ocasiones para resolver problemas más allá de las capacidades del jefe del relleno.

7.2 PLAN DE OPERACIÓN

A la hora de comenzar la operación de un nuevo relleno se debe hacer énfasis en la importancia de hacerlo bien y alcanzar estándares de operación adecuados. Para esto es necesario capacitar al personal y contar con un jefe del relleno que esté presente la mayor parte del tiempo. Es poco probable que la operación sea exitosa si la dirección es realizada desde una oficina externa al sitio.

Adicionalmente al jefe del relleno se le debe otorgar la autoridad suficiente para tener capacidad de resolver las actividades diarias del relleno y tener recursos y capacidad financiera para ello.

La operación de un relleno sanitario es una actividad compleja que debe ser debidamente planificada y llevada a cabo por personal con capacitación específica. El jefe del relleno debe velar por el cumplimiento del Plan de Operación el cual es la base para una operación adecuada.

Se recomienda que el Plan de Operación del sitio incluya al menos cinco aspectos generales (adaptado de [1]):

1. Recepción de residuos
 - a) Control de acceso.
 - b) Pesaje y vigilancia
2. Disposición de residuos
 - a) Plan de avance del relleno y dimensionamiento de celda diaria
 - b) Cobertura de las celdas
 - c) Tránsito y descarga de camiones
 - d) Distribución y compactación de residuos
 - e) Drenaje área de trabajo
 - f) Disposición de residuos especiales
3. Mantenimiento y control general del sitio
 - a) Mantenimiento de la maquinaria
 - b) Mantenimiento de la caminería y drenaje pluvial
 - c) Mantenimiento de la cortina vegetal
 - d) Control de voladuras
 - e) Control de olores
 - f) Control de vectores
 - g) Control del lixiviado
 - h) Control del biogás
 - i) Prevención y combate de incendio
 - j) Tareas especiales días de lluvia
4. Seguridad y salud ocupacional

- a) Condiciones de seguridad y salud ocupacional
- b) Capacitación del personal
- c) Equipos de protección personal
- d) Planes de contingencia
- e) Registros de incidentes
- 5. Plan de gestión ambiental
 - a) Plan de monitoreo (pluviales, aguas superficiales, lixiviado, gases, aguas subterráneas)
 - b) Registros

7.3 RECEPCIÓN DE RESIDUOS

7.3.1 Control de acceso

El ingreso de residuos al relleno es únicamente por el punto de acceso, el cual debe tener cartelería que indique claramente los residuos autorizados y no autorizados.

El control de los residuos comienza con el generador. Para el caso de los residuos no domiciliarios, el generador es responsable de brindar información confiable sobre sus residuos. El transportista es responsable de contar con documentos donde se especifiquen las características del residuo (la información debe ser brindada por el generador) y el origen del mismo.

Para ello el operador del relleno debe implementar un sistema de solicitud de permiso de disposición final. Para los residuos de origen industrial, comercial o de servicios, se deberá tramitar previamente un permiso de disposición, donde a través de una declaración, el generador informe el origen del residuo, la cantidad a ingresar, las características de humedad y si es necesario análisis de laboratorio que permitan clasificar el residuo de acuerdo al Dec. 182/13.

Quien realice el control de ingreso debe solicitar el permiso de disposición y realizar una inspección de las cargas de residuos entrantes para verificar que coincida con lo declarado.

Cada ingreso debe ser registrado con la siguiente información, número identificador de la pesada, matrícula del vehículo, origen, peso, N° de permiso, (ver **Tabla 7-1**). El ingreso debe ser únicamente en los horarios de funcionamiento establecidos.

El operador debe supervisar las actividades de descarga sea en el frente de trabajo u otro lado para evitar la disposición de residuos no autorizados.

El personal debe estar capacitado para reconocer, manejar y aislar residuos peligrosos u otros residuos no autorizados, ante la duda de la descarga de residuos no autorizados se debe proceder a su inspección y en caso necesario a la toma de muestra para análisis. Se deberá establecer un sistema de multas y/o el rechazo de los residuos para estos casos.

7.3.2 Pesaje en balanza y vigilancia

Todos los ingresos y salidas de camiones deben ser pesados y se debe realizar el registro del peso en forma digital. Para los casos en que no exista balanza en el relleno se debe registrar el volumen de la carga ingresada y una estimación de su densidad según el tipo de residuos.

La vigilancia del sitio debe prohibir el ingreso de animales y de personas no autorizadas. El personal a cargo de la vigilancia debe realizar inspecciones del estado del cerco perimetral y la cartelería.

Los sitios deben contar con un sistema de información electrónico, en su defecto un conjunto de planillas electrónicas, para el manejo de los datos que permita al menos:

1. Registrar información según Tabla 7-1.
2. Verificar la vigencia del permiso de disposición (para residuos de origen no domiciliario)
3. Vincular el ingreso con el pago de tasas de disposición.

4. Relacionar el ingreso con la ubicación de los residuos en las celdas operativas.

Tabla 7-1: Información requerida en el registro de ingreso

Nro. pesada	Matrícula	Fecha y hora ingreso	Hora de egreso	Origen del residuo	Tipo de residuo	Peso ingreso	Peso salida o Tara fija	Peso neto	N° permiso

Para los casos en que no existe balanza, en forma análoga se sugiere registrar la información presentada en la Tabla 7-2.

Tabla 7-2: Información requerida en el registro de ingreso cuando no existe balanza

Nro. ingreso	Matrícula	Fecha y hora	Hora de egreso	Origen del residuo	Tipo de residuo	Volumen ingreso estimado	Densidad residuos estimado	Peso estimado	N° permiso

7.4 DISPOSICIÓN DE RESIDUOS

7.4.1 Plan de avance del relleno

Como fuera presentado en el capítulo 3, en general los rellenos sanitarios se proyectan con una vida útil de 20 años. La construcción del relleno se realiza en 3 fases (aprox. 7 años c/u). Cada fase será llenada con residuos planificando celdas de operación para períodos de unos meses a un año. A su vez las celdas de operación están compuestas por varias celdas diarias.

Para realizar el seguimiento del avance del relleno es decir, evaluar si el mismo se está realizando de acuerdo a lo previsto en el proyecto ejecutivo, se realizará cada semestre un relevamiento topográfico de la celda operativa.

El análisis de la información registrada permite evaluar el avance del relleno, la disponibilidad de vida útil remanente y planificar cuando será necesaria la construcción de nuevas celdas.

7.4.1.1 Dimensionamiento de la celda diaria

El volumen de la celda diaria (V_{CD}) se puede calcular de la siguiente forma:

$$V_{CD} = \left(\frac{CD}{D} \right) * M_c$$

CD cantidad diaria de residuos (kg)

D densidad de los residuos compactados (kg/m^3)

M_c factor de material de cobertura (1.2 – 1.3), volumen de cobertura 20-30% del volumen de residuos.

La densidad de los residuos compactados también depende de la maquinaria utilizada en el frente de trabajo y la forma de operación. Como fuera mencionado, si se utiliza un topador y se realizan 3-4 pasadas por encima de cada capa de residuos se logran alcanzar densidades de $600 - 700 \text{ kg}/\text{m}^3$. Se pueden alcanzar densidades de hasta $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ con equipos destinados específicamente para la compactación de residuos

El avance o largo de la celda diaria (L_{CD}) se determina de la siguiente manera:

$$L_{CD} = \left(\frac{V_{CD}}{H * A_f} \right)$$

A_f Ancho de la celda o frente de trabajo

H Altura de la celda

La **Tabla 7-3** presenta valores sugeridos de ancho de celda de acuerdo a la cantidad de residuos dispuestos diariamente.

Tabla 7-3: Ancho del frente de acuerdo a la cantidad diaria de residuos [6]

Cantidad de residuos (ton/día)	Ancho de frente (A_f) (m)
16 a 40	>8
40 a 300	>12
>300	>16

Por otra parte, el ancho de la celda (o frente) debe prever 4 m por cada camión descargando en simultáneo (los vehículos tienen 2,5 m de ancho más 1 metro de separación a cada lado), se debe buscar un balance entre el ancho del frente y el tiempo de espera.

Cuando el frente de trabajo es innecesariamente grande es difícil de controlar, costoso de funcionar y desagradable. Los residuos expuestos pueden dar lugar a problemas de vectores y voladuras, mayor producción de lixiviado e incendios.

La altura de trabajo se define de acuerdo a los equipos disponibles, que tiene asociada la compactación alcanzada, las alturas de trabajo van desde 1,5 – 2m hasta 5 – 6m de acuerdo al tamaño del relleno.

Se recomienda tener más de un frente de trabajo pronto para ser utilizado ante una emergencia, es decir un camino de acceso y zona de descarga, como en caso de días de lluvia, si falla un camino poder acceder a otro frente de descarga y asegurar la continuidad del funcionamiento del relleno.

7.4.1.2 Controles

De acuerdo a lo establecido en el plan de llenado, los registros de ingreso y los relevamientos de cotas del avance del relleno, se deben evaluar para ver cómo avanza el llenado del relleno. El avance del relleno y la forma del mismo deben ser controlados, así como la pendiente de los taludes 3H:1V. También se debe controlar la existencia de fugas de gas y lixiviado, pues las mismas comprometen la estabilidad del relleno.

En base al relevamiento topográfico del avance del relleno se debe verificar que se esté avanzando de acuerdo a lo planificado. De lo contrario se deberán analizar las causas de la desviación para poder tomar medidas correctivas.

7.4.1.3 Registros

Se debe llevar un registro de los asentamientos, los mismos ocurrirán durante toda la fase operativa y post operativa de un relleno. Ocurren en forma diferencial, no son uniformes a lo largo del relleno. Los asentamientos son inevitables cuando se detecten depresiones en superficie las mismas deben ser cubiertas con material y así se evita el estancamiento y la infiltración de lluvia. Para el control de asentamientos se colocan losas de hormigón, las cuales son relevadas topográficamente cada año, en el largo plazo permiten evaluar si se estabilizó el relleno para habilitar futuros usos del mismo post clausura.

El registro del período de operación de cada celda operativa, a través del control del volumen y las cantidades permite obtener la compactación efectivamente alcanzada.

7.4.2 Tránsito y descarga de camiones

Es importante ordenar el tránsito y la descarga de camiones para realizarlo en cualquier condición climática. Debe de preverse suficiente espacio para que los camiones realicen la descarga al pie o en la parte superior del frente de trabajo según sea apropiado y fomentar que los conductores minimicen el tiempo de descarga.

En general se recomienda la descarga al pie del frente de trabajo (y no en lo alto) porque hay mayor reparo y es menos visible. Tiene asociada la ventaja de que el equipo compactador empuje hacia arriba los residuos lo que aumenta la visibilidad y mejora la compactación.

Se recomienda prever lugar para los camiones de descarga lenta (por ejemplo camiones sin caja volcadora de descarga manual).

7.4.2.1 Controles

Se debe verificar que se realice diariamente la señalización de las vías temporarias y el frente de trabajo, además también se debe controlar que estas sean utilizadas.

Se debe evitar que vehículos de pequeño porte accedan al frente de trabajo pues los mismos pueden ocasionar congestión en el tránsito, posiblemente no tengan sistema de descarga automática e inclusive ocasionar accidentes.

7.4.2.2 Registros

Se debe llevar registro de todos los accidentes ocurridos y los motivos de los mismos.

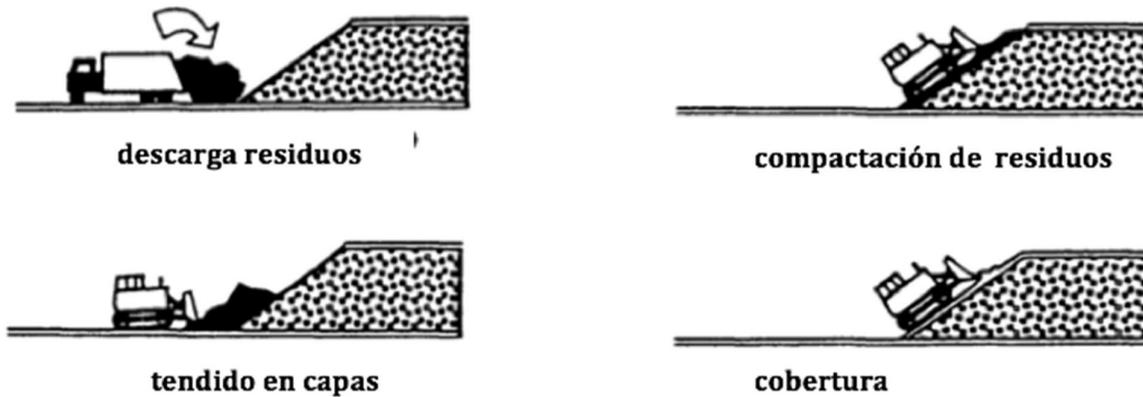
7.4.3 Distribución y compactación efectiva de los residuos

Para la disposición de residuos el camión recolector ingresa con marcha reversa al frente de trabajo y descarga la carga. Luego el equipo topador distribuye los residuos en una capa fina, la que es compactada por otro equipo compactador o en caso de no contar por el mismo topador por el peso del equipo (ver **Figura 7-1**).

De acuerdo a [4] 3 a 5 pasadas del equipo pesado sobre los residuos colocados en capas sueltas de 30 - 50 cm proporcionan la mejor compactación sin necesidad de uso innecesario de equipo. Menos pasadas del compactador resultan en una menor densidad de los residuos compactados. Más pasadas generalmente proporcionan poca compactación adicional, pero resultan en un uso adicional significativo de combustible y desgaste en el equipo.

La compactación mínima que se debe lograr es de 0.6 ton/m³ (lograda con un topador sobre orugas). También se puede lograr compactaciones mayores a 0.9 ton/m³ con un compactador de residuos.

Figura 7-1: Disposición de residuos [1]



Una correcta compactación permite minimizar los asentamientos a producirse en el período de estabilización y consolidación final del relleno, además de optimizar la vida útil del relleno.

7.4.4 Cobertura de las celdas

La cobertura diaria debe aplicarse a los residuos cada día antes del cierre de la jornada. La cobertura se debe realizar con tierra. En caso en que las condiciones meteorológicas no permitan realizar esta cobertura, se puede realizar una cobertura temporal con film impermeable.

Las funciones principales de la cobertura diaria son minimizar los impactos adversos como olor, polvo, voladura, la proliferación de vectores y el riesgo de incendio. Además contribuye a desestimular el ingreso de personas en busca de materiales con valor. También es deseable que el material de cobertura diaria limite la infiltración de lluvia en el residuo (y por lo tanto la cantidad de lixiviado generado) y la emisión de gas del relleno.

Se debe mantener una reserva de material de cobertura diaria adyacente al frente de trabajo. Si este material no puede ser extraído en el sitio, se recomienda que al menos esté disponible en el relleno el material de cobertura para 1 semanas.

La cantidad de residuos expuestos debe mantenerse al mínimo en todo momento. Es posible que se requiera cobertura adicional para cargas que contengan grandes cantidades de residuos altamente biodegradables, con el fin de minimizar la atracción de vectores y los impactos adversos de los olores.

La cobertura intermedia es una cobertura más importante aún que la cobertura diaria. Se utiliza para cerrar una celda que no recibirá capas adicionales de residuos durante algún tiempo o que no se tapaná definitivamente durante algún tiempo.

Las celdas que no reciben residuos durante más de 90 días deben tener una capa intermedia de suelo que cumpla los siguientes requisitos [5]:

- la capa de cobertura debe ser una capa mínima de 30 cm de material de un suelo de grano fino y gran cohesión
- el suelo debe tener una conductividad hidráulica saturada de menos de 1×10^{-3} cm/s para limitar la tasa de infiltración de lluvia.

7.4.4.1 Controles

A través de inspecciones del frente de trabajo se debe controlar la ejecución de la cobertura diaria y así prevenir los ya mencionados potenciales impactos ambientales asociadas a la falta de cobertura.

En el control del frente de trabajo se debe verificar si se está desarrollando de acuerdo a lo planificado desde el punto de vista de tamaño y la no invasión de otras áreas u otras celdas.

7.4.4.2 Registros

Se debe realizar el registro de las cantidades utilizadas de material de cobertura del suelo y el número de horas trabajadas por la maquinaria.

7.4.5 Drenaje del área de trabajo

El agua puede impedir la actividad del frente de trabajo al reducir el movimiento del camión que quiere descargar en condiciones con barro y puede causar problemas de tracción para el equipo topador. Una regla general para mantener el área de trabajo drenada es evitar las áreas planas en el relleno sanitario en que en las depresiones pueden llenarse de agua (estancamiento).

Además se debe asegurar que el agua pluvial del predio no ingrese al frente de descarga lo que produce más lixiviado. Las superficies expuestas del relleno (a menudo con cobertura intermedia o final) deben estar inclinadas para drenar el agua superficial lejos de la masa de residuos. Además, se pueden construir zanjas de desviación, drenajes y bermas para guiar el agua lejos de la zona activa del relleno. De manera similar, las zanjas de desviación, los drenajes y las bermas de suelo también pueden emplearse para desviar la precipitación que de otro modo escurriría hacia el relleno desde puntos más altos.

Las tuberías de lixiviados de las celdas que aún no están operativas se conectan a la red de agua pluvial hasta que se comience a disponer residuos en ellas, momento en que se conducen a la planta de tratamiento lixiviado (ver 5.5.7).

7.4.6 Disposición de residuos especiales

Los residuos especiales que requieran una disposición específica (por ejemplo residuos olorosos, animales muertos) deben ser derivados a un área separada del frente activo principal. Para esto se debe excavar una fosa en los residuos y depositar los residuos especiales para luego cubrirlos con residuos.

7.5 MANTENIMIENTO Y CONTROL GENERAL DEL SITIO

7.5.1 Mantenimiento de maquinaria

La vida útil de los equipos utilizados en rellenos sanitarios está estrechamente asociado con el programa de mantenimiento de equipos que se realice.

El mantenimiento y la reparación de equipos requiere ser programada de manera de satisfacer las necesidades del relleno y cumplir con el objetivo de disponer residuos en forma continua. Siempre que sea posible es conveniente realizar las inspecciones y reparaciones en el relleno y evitar el traslado de máquinas fuera del mismo.

Se recomiendan buenas prácticas para el mantenimiento de equipos, como ser [6]:

- a) La limpieza frecuente de todo el material rodante asignado a la manipulación de residuos sólidos es esencial para mantener el equipo en buen estado. La limpieza ayudará a aumentar la vida útil de ese equipo y disminuirá el potencial desgaste por fricción resultante de la acumulación de polvo y partículas en los diferentes componentes mecánicos del equipo (rodamiento).
- b) La inspección y limpieza regulares y frecuentes (incluyendo el lavado, si es necesario) de los radiadores de las máquinas es otra tarea que debe ser programada y aplicada para toda la flota que está en contacto directo con los residuos sólidos. Esta operación debe realizarse al menos diariamente.
- c) Las operaciones de mantenimiento descritas en los manuales de operación y mantenimiento de los equipos, suministrados por los fabricantes deben programarse previamente en el plan de operaciones y realizarse de acuerdo con las especificaciones del fabricante.
- d) En rellenos grandes, los operarios del relleno deben estar capacitados para realizar reparaciones mecánicas ligeras (aquellas que no requieren más de dos días para completarse). Para realizar este tipo de reparaciones, es muy importante que todas las herramientas necesarias y un stock de

repuestos adecuado estén disponibles en el sitio, o bien contar con un proveedor confiable que pueda suministrar los repuestos en forma inmediata.

e) Registrar los mantenimientos realizados a cada equipo.

Los equipos necesitan suministro de combustible, sino se cuenta con un suministro diario de alguna estación de servicio en el sitio, se debe prever un vehículo con tanque cisterna o algún otro mecanismo para el suministro de combustible.

7.5.1.1 Controles

Los controles a realizar son los de rutina diarios, semanales y los mantenimientos programados establecidos por el fabricante. Además se debe realizar control del stock de repuestos y la identificación de necesidades de compras.

7.5.1.2 Registros

Los registros del mantenimiento de los equipos usualmente se refieren al establecimiento de un archivo separado de cada máquina. Deben registrarse cada uno de los controles mencionados, así como el consumo de combustible y las horas de uso.

7.5.2 Mantenimiento de caminería y drenajes pluviales

Es fundamental el mantenimiento de vías de accesos y caminería interna del relleno. Se deberán reparar regularmente los caminos en mal estado, rellenando los baches. Esto permite la agilidad en la circulación y previene roturas de los vehículos.

El control del estado de las vías de acceso es fundamental para asegurar la continuidad de la disposición de residuos. El control del estado de la caminería en los días de lluvia permite definir las necesidades de reparación y en caso de que corresponda proceder a reparar la caminería luego de la lluvia.

Además se debe regar los días secos en los que el viento y vehículos levantan mucho polvo y evaluar la eventual pavimentación de tramos.

7.5.3 Mantenimiento de cortina vegetal, áreas verdes y limpieza de predio.

Mantenimiento de las áreas verdes circundantes a la celda, las mismas no podrán tener malezas, pastizales y arbustos de cualquier tipo, durante todo el período de operación de la celda.

Se debe mantener corto el pasto principalmente en época seca para evitar la propagación de un eventual incendio.

7.5.4 Control de voladuras

Las voladuras se producen cuando se depositan residuos y no se realiza una adecuada compactación y/o cobertura. El uso de un topador o un compactador, asegura que el material capaz de ser soplado por el viento sea compactado y, junto con la aplicación regular de la cobertura diaria, se pueden minimizar las voladuras.

Para reducir el riesgo de afectación y quejas de los vecinos, el control efectivo de voladuras, logrado a través de una jerarquía de medidas, aplicadas de forma rutinaria y exhaustiva, es una herramienta esencial de gestión del sitio.

La jerarquía de medidas de control de voladuras se basa primariamente en la contención de la carga y el manejo de la descarga, y secundariamente en mallas móviles y recogida de basura en los límites del sitio [5]:

- a) Control de carga: minimizar las pérdidas de residuos durante el trayecto hacia el relleno tapando la carga si es necesario. Complementar con inspecciones y limpieza de las vías de acceso.
- b) Manejo de residuos: minimizar los residuos expuestos a la acción del viento, compactando y tapando los residuos lo antes posible una vez descargados.

- c) Pantallas portátiles: pueden utilizarse como barreras para retener voladuras, deben ser firmes y resistentes. Se deben limpiar frecuentemente.
- d) Cercado perimetral: es la última línea de defensa para las voladuras. Es imprescindible la limpieza periódica del mismo, sino en ocasiones de viento fuerte el peso de los residuos atrapados puede voltearlo.

7.5.5 Control de olores

El olor presente en un relleno sanitario se debe principalmente a la descomposición anaerobia de los residuos, la cual genera gas y lixiviado. Las buenas prácticas de diseño y operación como la cobertura diaria y el sistema de extracción de gases son fundamentales para el control de olores.

Los olores del lixiviado pueden ser el resultado de escapes incontrolados de los lixiviados de la masa de residuos, o de los estanques o lagunas de tratamiento de los lixiviados.

Las principales medidas de control de olores en un relleno sanitario son [5]:

- a) Enterramiento en fosa de residuos olorosos.
- b) Cubrir adecuadamente los residuos, pues la cobertura absorbe olores, entre otras ventajas.
- c) Limitar el tamaño del frente de trabajo: minimizar la superficie de trabajo del relleno contribuye a minimizar la superficie a partir de la cual los olores pueden escapar.
- d) Extracción, recolección y tratamiento de gases de relleno.
- e) Control de los lixiviados: cuando se producen fugas de lixiviado tiene asociado problemas de olor, éstas deben ser cubiertas y reparadas mejorando localmente el drenaje interno del relleno para evitar que se produzcan nuevas fugas y evitar el escurrimiento hacia cuerpos de agua cercanos.
- f) Existencia de zonas de amortiguación (maximizando la distancia a posibles vecinos).

7.5.6 Control de plagas y vectores

Las plagas (por ejemplo: las aves, los roedores y las moscas) son un posible riesgo para la salud pública y son una gran molestia para los trabajadores y los habitantes de los alrededores de un relleno. La abundancia de plagas alrededor de un relleno es un indicador de mala gestión del mismo [1].

La práctica de control más eficaz es la cobertura rápida y completa de todos los residuos. Se puede complementar además con fumigaciones en caso de ser necesario.

7.5.7 Gestión del lixiviado

La gestión del lixiviado comprende el sistema de captación y tratamiento del mismo. Durante la operación del relleno se recomienda realizar recorridos para identificar posibles escapes de lixiviado por las paredes del relleno. En caso de ocurrencia se debe verificar si el drenaje está tapado y eventualmente construir algún dren adicional.

La planta de tratamiento de lixiviado debe contar con procedimientos de operación para cada unidad existente y el personal a cargo de la misma debe ser capacitado.

7.5.7.1 Control

Se debe controlar, a través de análisis de laboratorio, que el tratamiento del lixiviado esté siendo realizado de acuerdo a lo proyectado y que el lixiviado tratado cumpla con las condiciones de vertido.

7.5.7.2 Registro

Se debe realizar el registro de la generación y de la gestión del lixiviado a través del control de la calidad y el caudal vertido. Si se está generando más lixiviado del previsto puede ser un indicador de fallas en la cobertura diaria o en la gestión de las pluviales.

Se debe analizar el desempeño del relleno y realizar informes mensuales de operación de la planta de tratamiento de efluentes.

7.5.8 Gestión del biogás

La gestión del biogás comprende el sistema de captación y venteo o quema del mismo. Durante la operación del relleno se recomienda realizar recorridas para identificar posibles escapes de gas desde la masa de residuos, en caso de ocurrencia se debe proceder a tapar la superficie.

7.5.8.1 Control del biogás

Comprende el control de la cantidad generada y la composición o calidad del biogás.

7.5.8.2 Registro

Se debe realizar el registro de la generación y de la gestión del biogás para evaluar el desempeño del sistema de captación. El análisis de la información registrada permite ajustar las predicciones de generación realizadas durante la etapa de diseño.

7.5.9 Prevención y combate de incendios

Lo más importante para controlar los incendios es mantener un estricto control sobre los pequeños focos que se presentan y que se deben apagar prioritariamente. Si se observa humo o una pequeña llama y se apaga inmediatamente se puede evitar un gran incendio. Las medidas a tomar en este sentido son [9]:

- a) Proceder de acuerdo al plan de emergencias contra incendios;
- b) Instalar extintores portátiles y tener operativo un extintor en el frente de trabajo;
- c) Realizar cursos de capacitación a todo el personal;
- d) Contar con un acopio de tierra en el frente de trabajo para poder recubrir residuos encendidos;
- e) Prohibir fumar en todo el recinto, con excepción de zonas identificadas del sector de oficinas y mantenimiento específicamente indicadas para este fin;
- f) Controlar periódicamente el funcionamiento del sistema de captación de gas;
- g) No usar agua para la extinción de fuegos en el relleno sanitario.

En caso de pequeños incendios los pasos a seguir son:

- a) Cobertura con tierra en abundancia (mínimo 80 cm. por encima de las llamas)
- b) Compactación de los residuos con un pisón de mano, de barril o con un máquina (por lo menos 5 pasos de tractor o su equivalente, con el pisón de mano), acción que se realiza hasta tener la certeza que el humo que sale sólo es vapor de agua. Pasada una hora después de la compactación inicial se debe volver a compactar para evitar futuros incendios.
- c) Someter estos focos de pequeños incendios a estricto control durante los días siguientes y cada vez que se observe humo repetir las operaciones uno y dos.

Para prevenir incendios que se pueden propagar desde un punto externo hacia el predio del relleno se debe contar con área cortafuegos (zona de amortiguamiento) y mantener corta toda la vegetación que rodea el relleno. En una sequía el fuego se puede propagar y llegar al relleno, esto se evita manteniendo corta la vegetación y limpios los cortafuegos.

7.5.10 Tareas especiales en días de lluvia

Los períodos con fuertes lluvias pueden impedir que los vehículos de recolección de residuos circulen para descargar los residuos en el frente de trabajo.

La **Tabla 7-4** presenta los problemas que comúnmente ocurren los días de lluvia y posibles soluciones [1].

Tabla 7-4: Problemas y soluciones para días de lluvia (adaptado de Norheim et al. 1987)

Problema	Prevención / Solución
Rotura de camino de acceso	<p>Agregar escombros, rocas triturada o cenizas (los días secos posteriores a la lluvia)</p> <p>Tener preparado un camino alternativo u otro frente de descarga con un camino alternativo.</p> <p>Mantener un área de trabajo especial con acceso permanente para luego realizar una transferencia, es decir luego se debe levantar y llevar al frente de descarga.</p>
Rotura del frente de trabajo	<p>Tener preparado un frente alternativo.</p> <p>Almacenar bien el material de cobertura y aplicarlo cuando sea necesario</p> <p>Mantener el equipo de compactación fuera del área, descargando y moviendo residuos en la parte superior o inferior de la superficie de trabajo</p> <p>Mantener la pendiente del área de descarga para permitir el escurrimiento</p>

Además es necesario contar con equipamiento disponible en el frente de descarga (perno, lingas y grilletes) para sacar un vehículo que se haya enterrado.

7.6 SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL

El control de las condiciones de seguridad en un relleno sanitario incluye [4]:

- Restringir la entrada al sitio usando una cerca o barrera alrededor del sitio y tener un punto acceso a través del cual entren y salgan todos los vehículos y personas.
- Proceder correctamente con el manejo de residuos que no corresponden su ingreso y con residuos con fuego.
- Emplear personal debidamente capacitado para controlar el acceso al sitio por tráfico vehicular y peatonal.
- Mantener las características físicas de control de acceso y componentes tales como puntos de accesos, cercas, caminos, etc.
- Identificar, controlar y vigilar a todos los visitantes, usuarios del sitio y empleados. Es necesario conocer *en todo* momento quienes se encuentran dentro del predio.

La seguridad del lugar se mantiene y/o se logra mediante una planificación cuidadosa, la provisión y utilización de equipos apropiados y mediante la capacitación del personal.

El sitio y todas las estructuras deben estar equipadas con extintores, además en el sitio debe haber un botiquín de primeros auxilios bien equipado y uno o más integrantes del personal debe contar con formación de primeros auxilios.

Este procedimiento, así como los procedimientos de respuesta a emergencias, deben estar documentados disponibles en el relleno y deben ser el foco de la capacitación regular del personal del sitio.

7.6.1 Capacitación del personal

Los empleados deben estar adecuadamente capacitados en los aspectos de seguridad relacionados con el área operacional y la implementación de las reglas primarias de seguridad [4]:

- No permitir que las personas bajo la influencia del alcohol o sustancias controladas trabajen en el sitio o usen el sitio.

- b) No permitir que personas ajenas al sitio estén en el frente de trabajo, menos aún niños.
- c) No permitir que los camiones descarguen los residuos muy próximos unos de otros.
- d) Separación completa de los camiones de descarga mecánica de los que deben ser descargados manualmente. La descarga manual requerirá menos espacio entre los camiones pero requiere mucho más tiempo para descargar.
- e) Se prohíbe fumar en todo el relleno.
- f) No permitir el ingreso de residuos peligrosos o con fuego.

7.6.2 Equipo de protección personal

Todos los operarios del sitio deben estar adecuadamente equipados de acuerdo a la tarea que realicen. En la mayoría de los casos, los chalecos de colores brillantes y con reflectivos, zapatos resistentes y guantes se consideran esenciales.

Debe contarse con procedimientos de seguridad y protección, bien documentados y actualizados a fin de que el relleno de seguridad sea un lugar de trabajo seguros. Los procedimientos de seguridad deben revisarse periódicamente para determinar su pertinencia y aplicabilidad. La capacitación y la comprensión de los procedimientos de seguridad del sitio es esencial si se quiere lograr el objetivo clave de minimizar el daño.

7.6.3 Planes de contingencia

Se debe contar con planes de contingencias que contemplen casos de incendios, explosiones, fenómenos meteorológicos graves y derrames accidentales de combustible.

El control en estos aspectos refiere a que el personal tenga presente los procedimientos establecidos para actuar en caso de ocurrencia de alguna de estas contingencias.

7.6.4 Registro de incidentes

Para prevenir los accidentes es necesario registrar e identificar los incidentes ocurridos durante la operación para corregirlos. Hay que instruir al personal de registrar los incidentes que ocurran en todas las etapas de operación del relleno: en la recepción de residuos, disposición de residuos y en el mantenimiento y control del sitio.

El análisis de las causas del incidente permite tomar acciones concretas para evitar futuros accidentes.

7.7 PLAN DE GESTIÓN AMBIENTAL

El plan de gestión ambiental de un relleno sanitario tiene por objetivo realizar un seguimiento del desempeño ambiental del relleno, a través del monitoreo de las emisiones, análisis de resultados y evaluación de la necesidad de medidas correctivas para evitar los potenciales impactos ambientales asociados.

Los principales controles a realizar en un relleno sanitario son:

1. Control de pluviales
2. Control de aguas superficiales
3. Control de gases
4. Control de aguas subterráneas
5. Control de lixiviados

El plan de monitoreo planteado comprende los puntos para la toma de muestras, las frecuencia de análisis y los parámetros a analizar para realizar dichos controles. El mismo debe realizarse rutinariamente y los registros deben mantenerse en el sitio.

7.7.1 Plan de monitoreo ambiental

El plan de monitoreo ambiental se presenta en la **Tabla 7-5**, plantea el aspecto ambiental a analizar, el sitio donde se realizará el muestreo, los parámetros a analizar y la frecuencia con la que se recomienda repetir los monitoreos. Los datos de dicho registro

Todos los datos del plan de monitoreo deben ser respaldados de *forma digital*. Su control y análisis permite asegurar el buen funcionamiento de la instalación y tomar acciones oportunas en caso de ser necesario.

Tabla 7-5: Plan de monitoreo ambiental durante la operación

Aspecto ambiental	Punto de monitoreo	Parámetros	Frecuencia
Pluviales	Cámara de descarga	Caudal, SST, pH	mensual
Aguas superficiales	En el curso de agua aguas arriba de la descarga	Olor, material flotante y espumas no naturales, pH	mensual
	En el curso de agua aguas abajo de la descarga	Olor, material flotante y espumas no naturales, color, turbiedad, pH, OD, DBO ₅ , AyG, sustancias fenólicas, nitrógeno amoniacal total, nitritos, nitratos, fósforo total, coliformes termotolerantes, CN total, CN libre, Ar, Cd, Cu, Cr total y hexavalente, Hg, Ni, Pb, Zn, Al, Se, Ag, Nonilfenol y nonilfenoletoxilados. **	cuatrimestral
Gases	Chimeneas	% CH ₄	mensual
Aguas subterráneas	Pozo aguas arriba Pozos aguas abajo	Nivel estático, olor, pH, DBO ₅ , AyG, Sustancias fenólicas, nitritos, nitratos, Cianuro total, As, An, Ba, Bo, Cd, Cu, Cr total y hexavalente, Hg, Ni, Pb, Zn, Al, Se, Ag, Nonilfenol y nonilfenoletoxilados.	cuatrimestral
Lixiviados*	Tanque de homogenización (pre tratamiento)	Caudal, pH, T, conductividad, DQO, DBO ₅ , SST, AyG	mensual
	Cámara de descarga (post tratamiento)	Caudal, conductividad, sólidos flotantes, temperatura, pH, DQO, DBO ₅ , SST, AyG, HCT, Al, As, Cd, Cu, Cr total y hexavalente, Hg, Ni, Hg, Pb, Se, Zn, CN total, tensoactivos aniónicos, tensoactivos no iónicos, nonilfenol y sus etoxilados, fenoles, Ptotal, N (Kje), N amoniacal, Nitrato más nitrito, Sulfuros, Coliformes termotolerantes, AOX.	cuatrimestral
<p>* Es probable que por razones operativas deban monitorearse con mayor frecuencia algunos parámetros en la planta de tratamiento de lixiviado.</p> <p>** Adicionalmente a los parámetros listados, se establece una lista de sustancias orgánicas tóxicas prioritarias para el ecosistema acuático, que integrarán el objetivo de calidad con los valores que allí se establece para cada sustancia, por su uso en el país o por el riesgo ambiental al ecosistema acuático que su uso potencial pudiera involucrar.</p>			

7.7.2 Registros

Se debe verificar que los controles ambientales se estén llevando a cabo y que todos los monitoreos realizados en el relleno deben sean registrados de acuerdo al procedimiento previamente establecido. Dichos registros deben conservarse durante la vida útil del relleno.

La información generada a partir de los monitoreos permite la evaluación del desempeño del relleno, en una primera instancia para la verificación del cumplimiento de la normativa ambiental y en segunda instancia para evaluar la evolución de los distintos aspectos ambientales e identificar cambios y causas de los mismos.

8 CLAUSURA Y POST-CLAUSURA

8.1 OBJETIVO

Una vez finalizada la vida útil del relleno sanitario comienza la etapa de cierre denominada clausura. Si bien en esta etapa no se disponen más residuos en el relleno el mismo sigue activo, generando biogás y lixiviado, los cuales deben ser gestionados al igual que en la etapa operativa del relleno. El objetivo del capítulo es brindar las bases para una correcta clausura de un relleno sanitario.

La etapa de clausura debe ser planificada y se deben realizar ciertas obras para el cierre:

1. Cobertura final
2. Adecuación de chimeneas
3. Adecuación de caminería
4. Adecuación de la gestión de pluviales
5. Adecuación de cartelería e instalaciones

La etapa post-clausura se desarrolla luego de que las obras de cierre están realizadas y comprende controles de seguimiento y mantenimiento de asentamientos, de la cobertura, del sistema de biogás y lixiviado.

8.2 OBRAS DE CLAUSURA DE CELDAS DE RELLENO

Cuando se cierra una celda se debe realizar la cobertura final de la misma. Ésta tiene por un lado el objetivo que de evitar el ingreso de agua pluvial a la masa de residuos, para lo cual se construirá un paquete impermeable para lograrlo. Por otro lado, tiene el objetivo de restaurar el terreno para lo que se instala una capa vegetal por encima del paquete impermeable.

8.2.1 Cobertura final

Para realizar la cobertura final se deben adecuar las pendientes y taludes de la masa de relleno con una capa de suelo seleccionado de 0,20m. Luego se coloca una capa de 0,6 – 0,9m de espesor de material arcilloso con una conductividad hidráulica por lo menos de $1 \cdot 10^{-6}$ cm/s [2].

Se recomienda la colocación de una primera capa de material arcilloso de 0.2 – 0.3 m compactarla y esperar al menos un mes para colocar la siguiente capa, esto ayuda a cubrir los desniveles que se produjeron en la primera etapa.

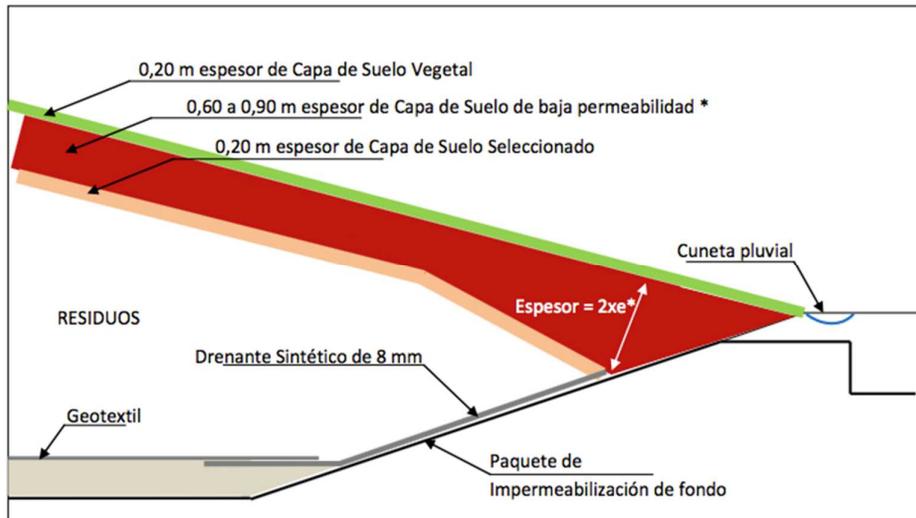
La compactación de la arcilla es importante para asegurar la impermeabilización e impedir que se extiendan las raíces de la cobertura vegetal que se coloca por encima de ella. La pendiente de cierre se recomienda sea 3H:1V para facilitar el drenaje.

Por encima de la capa de arcilla se coloca una capa de suelo para proteger de la erosión y poder cultivar la cobertura vegetal.

La cobertura vegetal recomendada es de bajo porte, no se recomienda colocar ni árboles ni arbustos, en general se recomienda pasto de rápido crecimiento, resistente al biogás y a la falta de agua.

La **Figura 8-1** presenta un corte esquemático del a cobertura final recomendada:

Figura 8-1: Esquema de cobertura final [3]



Nota: 2e* significa 2 veces el espesor de suelo de baja permeabilidad (0.6 – 0.9)

8.2.2 Adecuación de las chimeneas

Las chimeneas diseñadas para la captación de biogás deben ser adaptadas para que sigan funcionando luego de la clausura, dependiendo la gestión de biogás dada durante la operación.

8.2.3 Adecuación de la caminería interna

La adecuación de la caminería interna debe realizarse considerando el uso futuro del relleno. Debe adaptarse a la maniobrabilidad requerida por los vehículos que circularán por el sitio clausurado, por ejemplo vehículos para el mantenimiento paisajístico del predio (riego, etc.), vehículos para los monitoreos y eventualmente maquinaria para la reparación de la caminería u otra obra de mantenimiento.

8.2.4 Adecuación de la gestión de pluviales

Al igual que en la etapa de operación la gestión de aguas pluviales es fundamental para evitar el aporte de agua a las celdas. Una vez clausurada las celdas se deben adecuar los canales de recolección perimetrales para que los mismos desvíen el agua pluvial y la conduzcan hacia la descarga.

8.2.5 Adecuación de la cartelera e instalaciones

Se debe retirar la cartelera que indicaba los residuos autorizados y prohibidos, horarios de funcionamiento, etc. La misma debe ser sustituida por otra que indique que el sitio no recibe más residuos sólidos y además que está prohibido el ingreso al sitio de toda persona ajena al lugar.

Asimismo la antigua caseta de control de ingreso puede ser adaptada para ser utilizada para guardar herramientas o equipos para las tareas de mantenimiento y monitoreo. Si la balanza aún está en condiciones puede ser retirada para su reuso.

8.3 POSIBLES USOS FUTUROS DEL ÁREA

Si bien un relleno clausurado ofrece una disponibilidad de área para ser usada por la comunidad, los usos futuros de dicha área son limitados, para los mismos es necesario considerar que:

- Se debe preservar la integridad de la cobertura final
- La existencia de asentamientos diferenciales imposibilita o pone en riesgo la construcción de cualquier edificio encima del mismo.

Considerando lo anterior, lo más prudente es esperar a que el relleno haya alcanzado estabilidad física y química, para luego utilizar el área del relleno clausurado como área de recreación, para un parque a cielo abierto, canchas (fútbol, golf, atletismo), juegos, etc.

8.4 TAREAS DE POST-CLAUSURA

Durante la etapa de post-clausura se deben realizar tareas de mantenimiento y monitoreo, tales como:

1. Mantenimiento de la cobertura final
2. Mantenimiento de la caminería
3. Monitoreo de asentamientos
4. Monitoreo ambiental (lixiviado, gases, aguas superficiales y subterráneas)

8.4.1 Mantenimiento de cobertura final

Se debe inspeccionar periódicamente el estado de la cobertura final para identificar procesos de erosión, rotura o escapes de lixiviado o gas. Si corresponde se debe realizar la reparación y el mantenimiento de la misma.

8.4.2 Mantenimiento de la caminería

La caminería interna debe estar operativa para realizar las tareas post-clausura, por lo cual debe ser mantenida y reparada.

8.4.3 Mantenimiento de la red de pluviales

Los canales y conducciones de agua pluvial se deben mantener limpios para evitar obstrucciones y asegurar su funcionamiento.

8.4.4 Mantenimiento paisajístico

El mantenimiento paisajístico es importante para la integración con el entorno y la aceptación pública. El mismo refiere al mantenimiento de la barrera vegetal y al mantenimiento de la vegetación encima de la cobertura final.

8.4.5 Monitoreo de asentamientos del terreno

Se deben monitorear los asentamientos que ocurren luego de la clausura, los mismos pueden provocar roturas de la cobertura final, estancamiento de agua u otros, si esto ocurre se deben de realizar las reparaciones necesarias.

8.4.6 Monitoreo ambiental

El monitoreo ambiental de un relleno sanitario debe llevarse a cabo durante los 10 (diez) años luego de cumplida la clausura. Principalmente refiere al monitoreo de gases, lixiviados y a la calidad de las aguas superficiales y subterráneas. La **Tabla 8-1** resume los monitoreos a realizar durante la post-clausura, presentando, parámetros y frecuencia.

8.4.6.1 Monitoreo de gases y lixiviados

El monitoreo de gases se debe mantener hasta tanto se genere gas, el mismo debe hacerse tanto en los pozos o chimeneas de extracción.

El mantenimiento de la cobertura final ayuda a evitar fugas de biogás. Las mismas puede ser detectadas por el olfato o visiblemente si se identifica que la cobertura vegetal está deprimida.

El monitoreo del lixiviado refiere a continuar con el monitoreo del funcionamiento de la planta de tratamiento del lixiviado hasta tanto el mismo se siga generando. Los parámetros de monitoreo del lixiviado tratado son los mismos que durante la etapa de operación.

Si se constata un aumento en la tasa de generación de lixiviados puede dar indicios de la existencia de roturas en la cobertura final por donde ingresa el agua de lluvia.

8.4.6.2 Monitoreo de aguas subterráneas y superficiales

Los monitoreos de aguas subterráneas deben continuar luego de la clausura analizando los mismos parámetros que en la etapa de operación.

Las calidad de las aguas superficiales, aguas arriba y aguas abajo de la descarga del lixiviado tratado, debe ser monitoreada.

Tabla 8-1: Monitoreos a desarrollar durante la post-clausura

Matriz	Parámetros	Frecuencia
Aguas subterránea	Nivel estático, olor, pH, DBO ₅ , AyG, Sustancias fenólicas, nitritos, nitratos, Cianuro total, As, An, Ba, Bo, Cd, Cu, Cr total y hexavalente, Hg, Ni, Pb, Zn, Al, Se, Ag, Nonilfenol y nonilfenoletoxilados.	Cada 3 meses durante el primer año, cada 4 meses durante dos años y luego semestralmente [1]
Aguas superficiales	Olor, material flotante y espumas no naturales, color, turbiedad, pH, OD, DBO ₅ , AyG, sustancias fenólicas, nitrógeno amoniacal total, nitritos, nitratos, fósforo total, coliformes termotolerantes, CN total, CN libre, Ar, Cd, Cu, Cr total y hexavalente, Hg, Ni, Pb, Zn, Al, Se, Ag, Nonilfenol y nonilfenoletoxilados.	Cada 6 meses durante los primeros 2 años, luego anualmente [1]
Lixiviado tratado	pH, T, conductividad, DQO, DBO ₅ , SST, AyG	Mensualmente
	Caudal, conductividad, sólidos flotantes, temperatura, pH, DQO, DBO ₅ , SST, AyG, HCT, Al, As, Cd, Cu, Cr total y hexavalente, Hg, Ni, Hg, Pb, Se, Zn, CN total, tensoactivos aniónicos, tensoactivos no iónicos, nonilfenol y sus etoxilados, fenoles, Ptotal, N (Kje), N amoniacal, Nitrato más nitrito, Sulfuros, Coliformes termotolerantes, AOX.	Cada 4 meses durante dos años, luego anualmente [1]
Biogás	% CH ₄	Cada 3 meses [1]

9 ANEXOS

9.1 TIPOS DE RELLENOS SANITARIOS

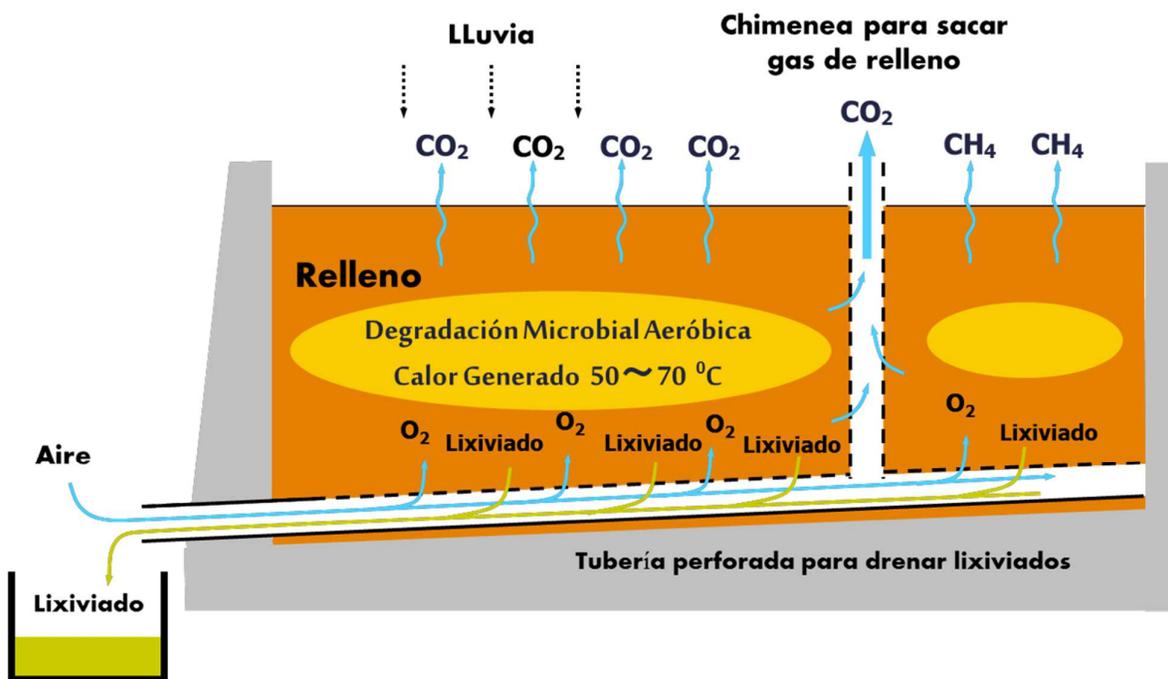
La clasificación de rellenos en semi-aeróbico o anaeróbico responde a la presencia o no de oxígeno en la descomposición de los residuos orgánicos, dando como resultado un composición diferente del biogás.

9.1.1 Relleno semi-aeróbico

Este método conocido como el método de Fukuoka, fue desarrollado en Japón, en el mismo se crean condiciones para la entrada de oxígeno en la masa de residuos resultando que gas generado está principalmente formado por dióxido de carbono (CO_2), ver **Figura 9-1**. Estas condiciones se logran utilizando drenajes y ventilaciones de mayor diámetro.

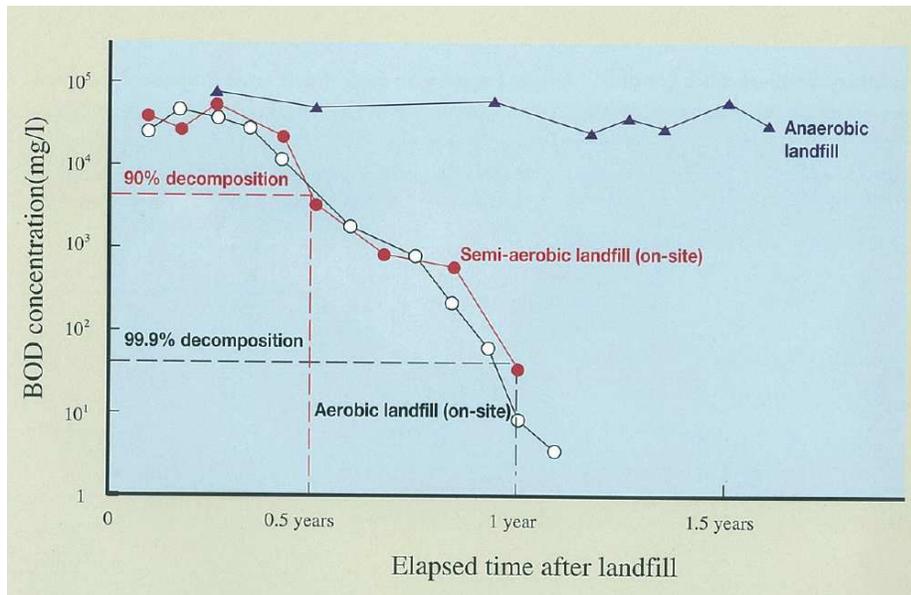
La degradación aeróbica de los residuos genera calor, lo cual hace que por diferencia de temperatura el gas caliente salga, favoreciendo el ingreso de aire frío (oxígeno).

Figura 9-1: Esquema método Fukuoka [1]



La **Figura 9-2** presenta la concentración de DBO_5 en el lixiviado en función del tiempo para cada tipo de relleno sanitario. El lixiviado generado en la descomposición aerobia se estabiliza en forma sustancialmente más rápida que el derivado de la digestión anaerobia.

Figura 9-2: Tipo de relleno y cambios en la concentración de DBO5 en el lixiviado [1]



Los rellenos semi-aeróbicos son simples de construir, operar y mantener, sin embargo, para el efectivo uso del método es muy importante entender el mecanismo de su funcionamiento así como la gestión y el mantenimiento del relleno y el monitoreo continuo de la calidad del lixiviado [1].

9.1.2 Relleno anaeróbico

En este tipo de relleno se dificulta la entrada de aire a la masa de residuos, generándose una descomposición anaerobia, en este caso el gas resultante tiene una concentración mayor de metano.

9.2 MÉTODO DE LLENADO DE UN RELLENO SANITARIO

La selección del método de relleno depende de las características del sitio. Los rellenos sanitarios suelen clasificarse de acuerdo al método de llenado/relleno como:

- de área,
- de celda excavada,
- de pendiente y
- combinado

9.2.1 Rellenos de área

Los rellenos de área se construyen por sobre el nivel de terreno. Se utilizan cuando las características del sitio no permiten su excavación, por la dureza del material existente o por la presencia de un nivel freático muy cerca de la superficie. Una de las principales ventajas que presenta este tipo de relleno es que el lixiviado es evacuado por gravedad y la existencia de escapes es fácilmente visible en los taludes. La principal desventaja es que el material de cobertura debe ser extraído de otro sitio (lo más cercano posible).

También se puede recibir material que se origine como descarte de obras públicas y/o privadas para utilizarlo en la cobertura y realización de caminos. En la aplicación de este método se requiere la presencia de un sólido terraplén o muro (natural o artificial) para compactar los residuos. Para poder elevarse es necesario tener una buena compactación y así lograr que los vehículos puedan subir al frente de descarga.

9.2.2 Rellenos de celda excavada

Los **rellenos de celda excavada**, también conocidos como de zanja o trinchera, como su nombre lo indica, se construyen excavando la celda en el sitio, para lo cual es necesario que el nivel freático esté a una profundidad adecuada. Tiene la principal ventaja de que el material excavado es utilizado como material de cobertura y por otro lado, sus principales desventajas son que el sistema de recolección de lixiviado está ubicado en profundidad y algunas veces el lixiviado debe ser bombeado para su tratamiento y además no se visualizan pérdidas.

Para su construcción se emplean equipos utilizados normalmente en movimiento de suelos como por ejemplo las retroexcavadoras. Los suelos con buenas características cohesivas, como por ejemplo los arcillosos o los limo-arcillas, son recomendables para la ejecución de trincheras, dado que se podría aumentar la inclinación de los taludes (sin peligro de desmoronamientos), reduciéndose el espacio requerido para su realización y permitiendo reducir la separación entre zanjas aledañas. El material extraído en la zanja se utiliza en la cobertura.

9.2.3 Método de pendiente

El **método de pendiente o depresión** se utiliza cuando el terreno tiene características que permiten o bien rellenar una depresión o utilizar una ladera o pendiente. La principal desventaja es la dificultad en la gestión del agua pluvial.

Se han utilizado barrancos y canteras como zonas de vertido. Las técnicas para colocar y compactar los residuos en este tipo de lugares varían según la geometría del lugar, las características del suelo, la hidrología y geología del lugar, los tipos de instalaciones para el control del gas y del lixiviado que van a utilizarse además del acceso al lugar. Generalmente se comienza el relleno de la zona de aguas arriba de la fosa para impedir la acumulación de agua. En este método se debe tener material disponible para realizar la cobertura de los residuos y la construcción de caminos.

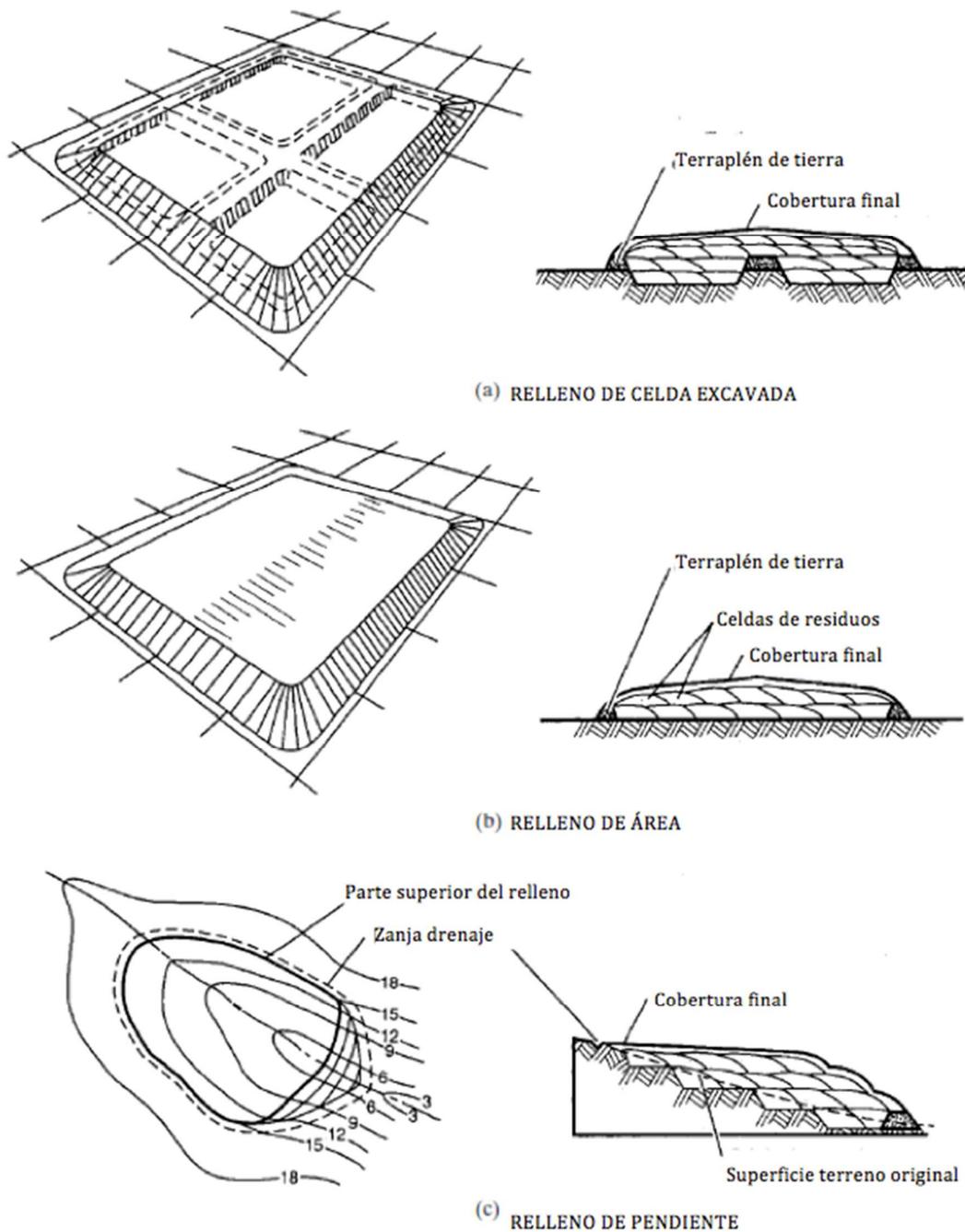
Es ideal para la disposición de residuos inertes.

9.2.4 Método combinado

El **método combinado** comienza con un relleno de celda excavada y una vez que se completan las celdas continua creciendo en altura como un relleno de área.

La **Figura 9-3** presenta los métodos de relleno.

Figura 9-3: Método de relleno [2]



La **Tabla 9-1** presenta las principales características de cada tipo de relleno, la aplicación y limitantes de cada uno.

Tabla 9-1: Características de los distintos tipos de rellenos

Tipos de rellenos	Características	Aplicación	Limitaciones
Área	<ul style="list-style-type: none"> * residuo dispuestos en grandes áreas 	<ul style="list-style-type: none"> * condiciones topográficas con pendientes suaves * disponibilidad de material de cobertura 	<ul style="list-style-type: none"> * mayor relación superficie / volumen total * mayor producción de lixiviados * mayor inversión de capital * mayor cobertura diaria (posible necesidad de importación) *impacto paisajístico
Trinchera	<ul style="list-style-type: none"> * residuos dispuestos en trincheras excavadas * la cobertura diaria se obtiene del material excavado para la trinchera * el tamaño es gobernado por la topografía, la facilidad de construcción y el volumen de residuos * por lo menos de 6m de profundidad * los suelos poco cohesivos no son recomendables porque no soportan pendientes 3 a 1 * mas control del ingreso de pluviales con menor generación de lixiviado que el método de área 	<ul style="list-style-type: none"> * volumen pequeño, * topográfica con pendientes medias , * nivel freático profundo, * menor relación superficie/volumen resulta en menor generación de gas y lixiviado 	<ul style="list-style-type: none"> * pérdida de volumen útil entre trincheras * menor eficiencia del uso de la tierra (ton/ha) * difícil de implementar y costear la captación y el tratamiento del lixiviado
Pendiente	<ul style="list-style-type: none"> * poblaciones pequeñas 	<ul style="list-style-type: none"> * condiciones topográficas particulares, existencia de declives con pendientes pronunciadas 	<ul style="list-style-type: none"> * riesgo de deslizamiento

9.3 CARACTERISTICAS Y CANTIDADES DE EN URUGUAY

9.3.1 Caracterización de residuos sólidos

En la **Tabla 9-2** se presentan los estudios más recientes realizados en los sitios de disposición final de algunos departamentos.

Tabla 9-2: Caracterización de residuos sólidos en Uruguay (*)

	Canelones	Montevideo	Melo	Paysandú	Salto	San José	Tacuarembó
Papel y Cartón	18,01%	19,05%	14,18%	11,88%	13,27%	12,84%	14,10%
Pañales	7,31%	3,57%	5,71%	4,87%	7,05%	6,11%	5,54%
Multilaminados	0,50%	0,84%	0,85%	0,51%	0,37%	0,60%	0,62%
Metales	2,72%	2,06%	3,07%	3,36%	3,53%	2,61%	3,49%
Pásticos film	13,81%	10,94%	7,71%	10,41%	11,40%	12,92%	12,43%
Plástico botellas	2,80%	1,80%	1,67%	2,47%	2,23%	2,35%	1,92%
Plásticos otros	2,79%	3,13%	3,55%	3,42%	3,14%	5,24%	2,48%
Vidrio	3,61%	5,73%	3,74%	3,46%	3,24%	2,45%	2,38%
Textiles	3,88%	2,55%	4,24%	4,53%	3,08%	2,70%	3,53%
Materia	32,65%	40,95%	43,81%	42,48%	42,94%	41,94%	42,15%
Goma,	1,56%	0,43%	1,75%	2,17%	1,58%	1,49%	1,59%
Madera y jardinería	3,71%	2,35%	2,06%	4,09%	2,72%	4,96%	3,88%
Escombros	2,10%	2,56%	2,41%	1,23%	0,56%	0,92%	1,48%
Materiales Compuestos	0,79%	0,61%	0,44%	1,30%	0,91%	0,44%	0,38%
Residuos Peligrosos	0,38%	0,18%	0,50%	0,55%	0,21%	0,30%	0,17%
Inertes y Otros	3,39%	3,24%	4,31%	3,27%	3,76%	2,13%	3,86%

(*) Estudio de Caracterización de residuos con fines energéticos, Informe 2. LKSur – 2013

9.3.2 Cantidades generadas

La Tabla 9-3 presenta la población urbana (censo 2011) por departamento del interior del país considerando las localidades de más de 1000 habitantes y la estimación de residuos generados por día considerando tasas de generación de acuerdo a la referencia [3].

Tabla 9-3: Población urbana por departamento y generación diaria de

Departamento	Población urbana (2011)	Tasa generación (kg/hab./día)	RSU (ton/día)
Montevideo	1,304,729	1.22	1,592
Canelones	451,821	0.82	370
Colonia	104,633	1.20	126
Maldonado	150,426	0.80	120
Salto	116,548	0.80	93
Rivera	93,601	0.90	84
Paysandú	101,929	0.80	82
San José	86,011	0.77	66
Artigas	63,609	0.90	57
Tacuarembó	76,046	0.50	53
Cerro Largo	74,566	0.70	52
Soriano	71,076	0.70	50
Florida	50,657	0.80	41
Rocha	57,499	0.70	40
Lavalleja	50,218	0.80	40
Río Negro	50,605	0.80	36
Durazno	50,117	0.60	30
Treinta y Tres	42,733	0.50	21
Flores	21,429	0.90	19

9.3.2.1 Ejemplo de cálculo cantidad anual de residuos

La **Tabla 9-4** presenta como ejemplo la generación de residuos año a año para el departamento de Artigas considerando una vida útil del relleno de 20 años.

La tasa de generación supone un porcentaje de recuperación de materiales, basado en políticas y estrategias para la separación en origen y valorización de los residuos.

Tabla 9-4: Ejemplo de cálculo

	Proyección Artigas	Proyección población urbana (95.4%)	tasa generación (kg/hab/día)	CDR (ton/día)	CRA _i (ton/año)
2017	74810	71369	0.80	57	20840
2018	74570	71140	0.80	57	20773
2019	74325	70906	0.80	57	20705
2020	74075	70667	0.75	53	19345
2021	73819	70423	0.75	53	19278
2022	73561	70177	0.75	53	19211
2023	73300	69928	0.75	52	19143
2024	73035	69676	0.75	52	19074
2025	72766	69419	0.75	52	19003
2026	72515	69179	0.70	48	17675
2027	72264	68940	0.70	48	17614
2028	72014	68701	0.70	48	17553
2029	71765	68464	0.70	48	17493
2030	71517	68227	0.70	48	17432
2031	71270	67991	0.70	48	17372
2032	71023	67756	0.70	47	17312
2033	70778	67522	0.70	47	17252
2034	70533	67289	0.70	47	17192
2035	70289	67056	0.70	47	17133
2036	70046	66824	0.70	47	17074
2037	69804	66593	0.70	47	17015
				CR (ton)	385487

La totalidad de residuos a disponer en los 20 años es de 385.487 ton.

Se tomaron los valores proyectados por el INE disponibles hasta 2025 y se extrapolaron hasta el 2037, además se supuso que el porcentaje de población urbana es el mismo que el dato registrado en el censo 2011.

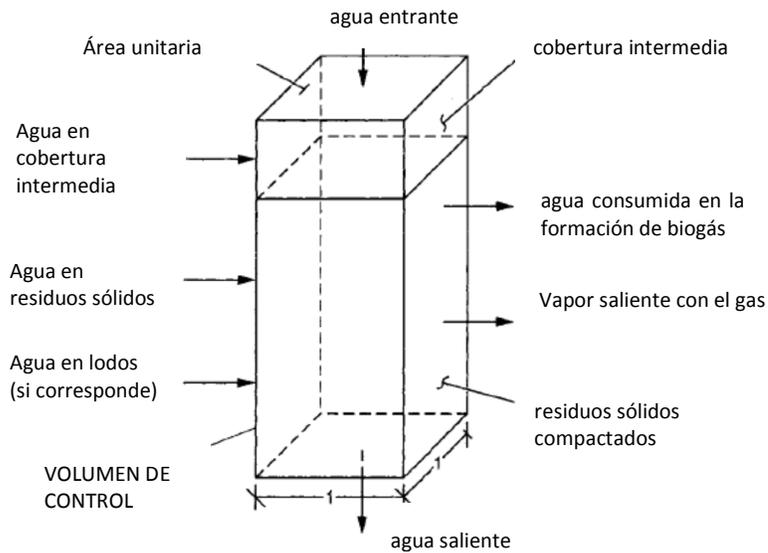
9.4 GENERACIÓN DE LIXIVIADO

Se plantean cuatro métodos para estimar la generación de lixiviado. El método de balance hídrico G. Tchobanoglous [1], balance hídrico australiano [4], el método suizo [5] y el método alemán [5].

9.4.1 Balance hídrico G. Tchobanoglous

La **Figura 9-4** presenta las componentes involucradas en el balance hídrico a un volumen de control con área unitaria, las mismas corresponden a: 1) el agua entrante a la celda desde arriba, la humedad de los residuos, la humedad del material de cobertura y la humedad del lodo (si es que se permite la disposición de lodos) y 2) el agua saliente junto con el gas del relleno como vapor de agua saturado y el lixiviado.

Figura 9-4: Representación esquemática para estimar generación de lixiviado



La siguiente ecuación representa el balance hídrico

$$\Delta S_{SW} = W_{SW} + W_{TS} + W_{CM} + W_{A(R)} - W_{LG} - W_{WV} - W_E + W_{B(L)}$$

Donde:

ΔS_{SW} es la variación de la humedad de los residuos sólidos dispuestos (kg/m^3)

W_{SW} es la humedad de los residuos sólidos entrantes (kg/m^3)

W_{TS} es la humedad de los lodos (kg/m^3)

W_{CM} es la humedad de la cobertura intermedia (kg/m^3)

$W_{A(R)}$ corresponde al agua de precipitación (kg/m^2)

W_{LG} es el agua perdida en la formación del gas (kg/m^3)

W_{WV} es el agua en forma de vapor de agua que sale con el gas (kg/m^3)

W_E es el agua perdida por evaporación (kg/m^2)

$W_{B(L)}$ corresponde a la generación de lixiviados (kg/m^3)

Para estimar cada uno de estos parámetros se remite a la bibliografía [2].

9.4.2 Balance hídrico

La producción de lixiviado se estima realizando un modelo de balance hídrico al sitio. El balance debe considerar la lluvia directa sobre los residuos (que se convierte en lixiviado), el aporte de flujo subterráneo (si corresponde) y la evapotranspiración, entre otros. Debe ser realizado y ajustado con el avance del relleno.

El balance hídrico debe ser realizado para varios escenarios como ser, el promedio mensual, eventos extremos como ser una precipitación con duración entre 2 a 5 días con período de retorno de 10 y 25 años. Estos cálculos serán útiles para predecir el rango de variación de la generación de lixiviado.

El cálculo de la producción de lixiviado viene dado por la siguiente ecuación¹¹:

$$L_o = [PE(A) + L + IARC + PE(I)] - [aP]$$

¹¹ Adaptado de [4]

Donde:

L_o = producción de lixiviado (m^3)

PE = precipitación efectiva (m)

A = área de la celda (m^2)

L = lodos (m^3)

IARC = infiltración en áreas recuperadas y clausuradas (m)

I = área de lagunas (m^2)

a = capacidad de absorción de los residuos (m^3/ton)

P = cantidad de residuos dispuestos en el período (ton)

Cabe aclarar que este cálculo es aproximado, el mismo desprecia pérdidas de líquido en la producción de gas, fermentación de los residuos, etc.

Precipitación efectiva:

Se define como la precipitación total menos la evapotranspiración. La precipitación es la cantidad de lluvia registrada en el período de análisis. La evapotranspiración engloba la evaporación y la transpiración de las plantas (en rellenos no clausurados puede ser ignorada).

Para el balance hídrico en celdas activas se suele suponer que toda la precipitación directa sobre la celda infiltra en los residuos. Para las celdas con cobertura intermedia se asume que el 25 - 30% de la lluvia directa infiltra y para las celdas clausuradas se toma entre 2 - 10%.

Lodos:

Refiere a la cantidad de lodos de plantas de tratamiento de efluentes que ingresan al relleno en el período de análisis.

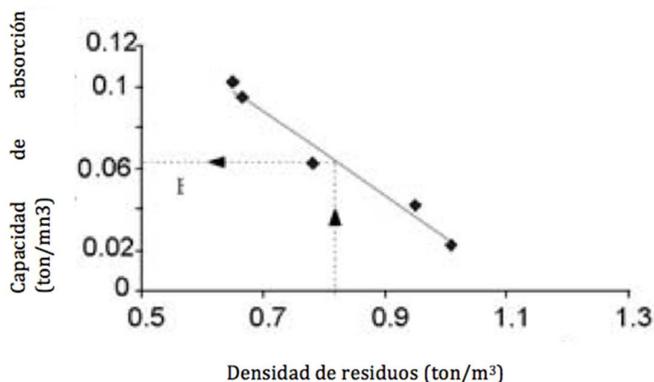
Cantidad de residuos:

La cantidad de residuos refiere a la cantidad que se espera recibir en el período en que se está haciendo el balance hídrico.

Capacidad de absorción:

Refiere a la cantidad de agua que puede ser absorbida sin generar lixiviado que depende del tipo de residuos, de la humedad inicial y de la densidad de compactación. La **Figura 9-5** presenta la relación entre la densidad de compactación y la capacidad de absorción de los residuos. Para un residuo con densidad de compactación $0.8 \text{ ton}/m^3$ la capacidad de absorción es de aproximadamente $0.07 \text{ m}^3/ton$ (por cada tonelada de residuos se absorben $0,07 \text{ m}^3$ de agua).

Figura 9-5: Relación entre densidad y capacidad de absorción de los residuos [4]



9.4.3 Método suizo

El método suizo [5] plantea la siguiente ecuación para el cálculo del caudal instantáneo de producción de lixiviado:

$$Q = K * \frac{P * A}{t}$$

donde:

Q = caudal medio de lixiviados (l/s)

P = Precipitación media anual (mm/año)

A = Área superficial del relleno (m²)

t = 31.536.000 s/año

K = coeficiente que depende del grado de compactación de los residuos,

$K = 0.25$ a 0.50 para compactación entre 0.4 a 0.7 ton/m³

$K = 0.15$ a 0.25 para compactación > 0.7 ton/m³

9.4.4 Método alemán

El Servicio Alemán de Cooperación Social - Técnica DED – Deutscher Entwicklungsdienst [5] plantea estimar la producción de lixiviados como un porcentaje de la precipitación anual en función del grado de compactación .

Tabla 9-5: Método Alemán para estimar producción de lixiviado [5]

Tipo de relleno	Producción de lixiviado (% precipitación)
Relleno manual (baja compactación)	60
Relleno compactado con maquinaria liviana (compactación media)	40
Relleno compactado con maquinaria pesada (compactación alta)	25

9.5 SEPARACIÓN ENTRE DRENES

El espaciamiento entre tuberías puede ser determinado utilizando el modelo de Mound (U.S. EPA, 1989):

$$h_{max} = \frac{L\sqrt{c}}{2} \left[\frac{\tan^2\alpha}{c} + 1 - \frac{\tan\alpha\sqrt{\tan^2\alpha + c}}{c} \right]$$

Donde:

h_{max} = carga hidráulica máxima por encima del paquete impermeable (m)

$c = q/K$

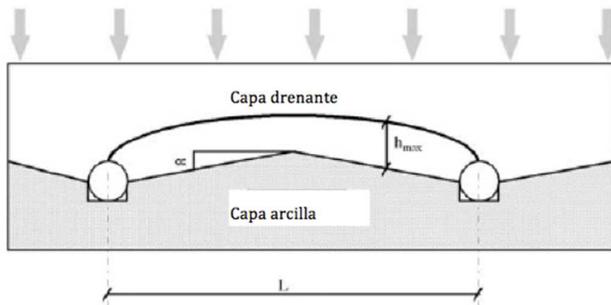
q = caudal de lixiviado (m³/s)

K = permeabilidad (m/s)

α = pendiente drenaje lateral (m/m)

La cantidad de lixiviado (c) puede ser estimada por el método balance hídrico y h_{max} suele tomarse igual a 0.30m, con estas consideraciones la única incógnita es L (separación entre tuberías). La **Figura 9-6** muestra esquemáticamente las distintas variables.

Figura 9-6: Separación entre tuberías [4]



9.6 MODELOS PARA ESTIMAR LA GENERACIÓN DE BIOGÁS

Modelo LandGEM de US EPA: dicho modelo plantea una modificación de la ecuación de decaimiento de primer orden:

$$Q_M = \sum_{i=1}^n 2kL_o M_i e^{-kt_i}$$

donde:

Q_M es la tasa máxima esperada de generación de biogás ($m^3/año$)

i es el tiempo incremental con paso 1 año

n es el año de cálculo

k es la tasa de decaimiento de metano ($año^{-1}$)

L_o es la generación potencial de metano (m^3/ton)

M_i es la cantidad de residuos en el año t

t_i es la edad de residuos M_i dispuestos en el año i (décima de año)

Cada uno de estos parámetros debe ser determinado para el relleno sanitario donde se quiere estimar la generación de biogás. Estos parámetros varían de acuerdo a la meteorología del sitio, las características de los residuos dispuestos y la operativa del sitio.

Un aspecto importante es la necesidad de caracterizar periódicamente las fracciones de residuos que se depositan en los rellenos sanitarios, llevar registro de los datos climatológicos y de las condiciones operativas aplicadas para la operación diaria [6].

Un valor promedio de la cantidad de gas recuperado en un relleno sanitario plantea $100m^3/ton$ de residuo dispuesto a lo largo de la vida útil del relleno (Gregory et al. 1991).

Modelo SCS: Se recomienda utilizar el modelo SCS que es esencialmente una versión modificada del modelo LandGEM de la EPA. El modelo SCS fue desarrollado en base a información real de recuperación de biogás de más de 150 sitios en América, de los cuales sólo dos son en Sudamérica) [7].

SCS propone valores de L_o y k para la ciudad de Montevideo, considerando la composición de los residuos en dicha ciudad [7]:

- $L_o = 68.0 \text{ m}^3/\text{ton}$
- $k = 0.28$ para la fracción orgánica
- $k = 0.056$ para papel y cartón
- $k = 0.014$ para madera, goma, textiles, cuero
- $k = 0$ para plásticos, metales, vidrio y otros inorgánicos.

Otro parámetro necesario para estimar la generación de biogás es la cobertura de captación de biogás, que depende de la distancia entre pozos, entre otros factores.

9.7 MÉTODO RACIONAL

Para el cálculo del caudal de agua superficial a conducir se recomienda el Método Racional, el mismo plantea la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{C * I * A}{3.6}$$

Donde:

Q = caudal en m^3/s

A = Área de drenaje en km^2

I = Intensidad en mm/hora

C = Coeficiente de escorrentía

La intensidad (I) puede calcularse a través de las curvas de Montana:

$$I = a * T_c^b$$

La **Tabla 9-6** presenta valores de los coeficientes de la ecuación de Montana según período de retorno a considerar y el tiempo de concentración:

Tabla 9-6: Curvas de Montana¹²

Tr (años)	Tc (min)	a	b
2	<60	4.76	-0.52
	>60	9.52	-0.68
5	<60	6.62	-0.52
	>60	13.23	-0.68
10	<60	7.84	-0.52
	>60	15.69	-0.68
20	<60	9.02	-0.52
	>60	18.05	-0.68

Para el cálculo del tiempo de concentración se sugiere utilizar el método de Desbordes recomendado por la Intendencia de Montevideo:

$$t_c = t_o + 6.625 * A^{0.3} * P^{-0.38} * C^{-0.45}$$

donde:

¹² Ajustadas para el caso de Montevideo por la Idem

A = área de la cuenca de aporte en ha

P = pendiente en %

C = coeficiente de escurrimiento (entre 0 y 1)

t_o = entre 5 y 10 minutos

Se sugiere tomar un coeficiente de escurrimiento ponderado considerando áreas de distintas características:

$$C = \frac{\sum C_i * A_i}{A_T}$$

Tabla 9-7: Coeficientes de escurrimiento según cobertura¹³

Prados:	Suelo arenoso, chato, 2%	0,05 - 0,10
	Suelo arenoso, medio, 2-7%	0,10 - 0,15
	Suelo arenoso, empinado, 0,15 - 0,20 7%	0,15 - 0,20
	Suelo arcilloso, chato, 2%	0,13 - 0,17
	Suelo arcilloso, medio, 2-7%	0,18 - 0,22
	Suelo arcilloso, empinado, 0,25 - 0,35 7%	0,25 - 0,35
Calles:	Asfálticas:	0,70 - 0,95
	De Hormigón:	0,80 - 0,95
	De Adoquines:	0,70 - 0,85
Calzadas y Veredas:		0,75 - 0,85

9.8 FÓRMULA DE MANNING

Para el diseño de canales abiertos se utiliza la fórmula de Manning:

$$Q = \frac{1.49 * A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

donde:

Q caudal de descarga en m³/s

1.49 factor de conversión de unidades

A área de la sección transversal del canal m²

R radio hidráulico del canal (m)

S pendiente del canal m/m

n coeficiente de rugosidad

Para ello se asume una pendiente, se determina el área y se verifica que la velocidad resultante ($v = \frac{Q}{A}$) sea menor que la velocidad máxima permitida en la canaleta que es función del material de la misma.

¹³ Valores utilizados por la Idem

9.9 CÁLCULO MAQUINARIA NECESARIA

Se plantea el ejemplo de dos poblaciones A y B con las siguientes características, ver **Tabla 9-8** (adaptado de [8]).

Tabla 9-8: Ejemplo poblaciones y maquinaria necesaria

Población	Tamaño	Tasa de generación (kg/hab./día)	Generación (ton/día)	Volumen (considerando densidad= 0,6m ³ /ton) (m ³ /día)
A	250.000	1	250	417
B	30.000	0,8	24	40

Con fines operativos se supone que en cada una se utiliza un tractor de orugas de 100HP (D4) con las siguientes características:

- Distancia de acarreo: 30m
- Velocidad de regreso 4km/h
- Rendimientos para:
 - Residuos: 37 m³/h
 - Suelo: 14 m³/h

El material de cobertura se supone en un 20% del volumen de residuos:

- Población A: material de cobertura = 417 m³/día * 0,2 = 83,4 m³/día
- Población B: material de cobertura = 40 m³/día * 0,2 = 8 m³/día

Tabla 9-9: Uso diario de la maquinaria

Población	Residuos (h/día)	Suelo (h/día)	Total (h/día)
A	$\frac{417 \text{ m}^3/\text{día}}{37 \text{ m}^3/\text{h}} = 11,3$	$\frac{83,4 \text{ m}^3/\text{día}}{14 \text{ m}^3/\text{h}} = 6$	17,3
B	$\frac{40 \text{ m}^3/\text{día}}{37 \text{ m}^3/\text{h}} = 1,1$	$\frac{8 \text{ m}^3/\text{día}}{14 \text{ m}^3/\text{h}} = 0,6$	1,7

Los cálculos indican que para servir una población de 250.000 habitantes el tractor de orugas operaría en 2 turnos de 8h con alguna hora extra. También indican que sería ineficiente tener esa maquinaria para una población de 30.000 pues no llegaría a operar 2 horas diarias.

10 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

10.1 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

[1] CEPIS. Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales.

10.2 CAPÍTULO 2: REQUERIMIENTOS DE AUTORIZACIÓN

[1] Banco Mundial, documento de trabajo 426 del Banco Mundial, elaborado por Philip Rushbrook y Michael Pugh. 1999

10.3 CAPÍTULO 3: LINEAMIENTOS INICIALES

[1] Nota de diálogo. BID: "Agua y saneamiento, situación actual, desafíos y casos de estudio". Tania Paez.

[2] Fichtner – LKSur, Plan Director de Residuos Sólidos para Montevideo y el Área Metropolitana, 2005.

10.4 CAPÍTULO 4: SELECCIÓN DE SITIOS

[1] Banco Mundial, documento de trabajo 426 del Banco Mundial, elaborado por Philip Rushbrook y Michael Pugh. 1999

[2] 40 CFR part 258 US EPA

[3] Propuesta técnica de reglamentación para la gestión de residuos sólidos industriales.

[4] Anexo de Selección de sitios del Plan director de residuos sólidos para Montevideo y el área metropolitana.

[5] LICITACIÓN PÚBLICA No 05/2009. TOMO II – Informe de Selección del Sitio para el nuevo Relleno Sanitario Regional de Residuos Sólidos.

[6] IDRC – Manual de gestión integrada de residuos sólidos municipales. América Latina y El Caribe.

10.5 CAPÍTULO 5: DISEÑO DEL RELLENO SANITARIO

[1] Townsend, Timothy G. "Sustainable Practices for Landfill Design and Operation" Springer.

[2] US EPA "Guidance for landfilling waste in economically developing countries". 1998.

[3] EPA "Landfill site design guide" Irlanda.

[4] Environmental Guidelines: Solid Waste Landfills, Second edition 2016, Australia.

[5] Best Available Techniques.

[6] Banco Mundial, documento de trabajo 426 del Banco Mundial, elaborado por Philip Rushbrook y Michael Pugh. 1999

[7] US EPA "Solid waste disposal facility criteria" – Technical Manual, 1993.

[8] Universidad de los Andes – "Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: Avances Recientes", Eugenio Giraldo.

[9] George Tchobanoglous "Handbook of solid waste management". Segunda edición, 2004.

[10] Manual de construcción y operación de rellenos sanitarios en Honduras.

[11] V. Córdoba, G. Blanco y E. Santalla - "Modelado de la generación de biogás en rellenos sanitarios. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires UNCPBA.

[12] Zamonsky P., Bajsa S. "Captura y quema de biogás en rellenos sanitarios y su utilización para la generación de energía eléctrica. La experiencia del relleno sanitario de Las Rosas".

- [13] Robén E. “Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios Municipales”, Loja Ecuador.
- [14] IDRC – Manual de gestión integrada de residuos sólidos municipales. América Latina y El Caribe.
- [15] Tomo II – RSU, Plan Director de Residuos Sólidos.
- [16] SCS Engineers – Pre-Feasibility Study, Montevideo – 2005.
- [17] CEPIS - Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales.
- [18] ESPINA, Informe final de determinación de caudales y caracterización - Licitación Pública N° 227856, Intendencia de Montevideo.
- [19] López Arriaza, Daniel. Modelo para el diseño de sistemas de captación y aprovechamiento de biogás producido en rellenos sanitarios. Chile 2016.
- [20] Martínez Guerrero, R. “Estudio sobre la concentración de contaminantes orgánicos, inorgánicos y biológicos en lixiviados del relleno sanitario “san nicolás” y en agua de pozos aledaños” – México 2007.
- [21] Espinosa Lloréns, M. “Análisis del comportamiento de los lixiviados generados en un vertedero de residuos sólidos municipales de la ciudad de la Habana” Rev. Int. Contam. Ambient vol.26 no.4 México nov. 2010.
- [22] Gonçalves Ferreira, A. Estudo dos Lixiviados Das Frações do Aterro Sanitário de São Carlos – Sp Por Meio da Caracterização Físico-Química. 2010.
- [23] METCALF Y EDDY. (1996): Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. México. Mc Graw Hill.
- [24] XV Reunión Anual para la Gestión Integral de Residuos Sólidos, Ministerio de Medio ambiente de Perú.
- [25] CEPIS/GTZ – “Tratamiento de lixiviados”, Costa Rica 1993.
- [26] The Fukuoka Method <https://kommusuri.files.wordpress.com/2015/08/fukuokawastemanagementmethod.pdf>
- [27] Paulo Gomes, L. “Estudos de Caracterizacao e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitarios para as condicoes brasileiras” 2009.

10.6 CAPÍTULO 6: CONSTRUCCIÓN

- [1] EPA Australia - Solid waste landfill guidelines.
- [2] SCS Engineers – Construcción de nuevos rellenos sanitarios.

10.7 CAPÍTULO 7: OPERACIÓN

- [1] Banco Mundial, documento de trabajo 426 del Banco Mundial, elaborado por Philip Rushbrook y Michael Pugh. 1999
- [2] SCS Engineers – Construcción de nuevos rellenos sanitarios.
- [3] MGAP - Manual de agua subterránea. Collazo P., Montaña J. 2012.
- [4] ISWA – Landfill operational guideline
- [5] EPA Australia - Solid waste landfill guidelines.
- [6] USEPA – Guidance for landfilling waste in economically developing countries, 1998.
- [7] BID - Nota de diálogo “AGUA Y SANEAMIENTO: Situación actual, Desafíos y Casos de estudio”. Paez T.
- [8] IDRC - Manual de gestión integrada de residuos sólidos municipales en Ciudades de América Latina y el Caribe.

- [9] CEPAL - Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales e Impacto Ambiental.
- [10] Ministerio de Medio Ambiente y Agua, Bolivia. Guía para el Diseño, Construcción, Operación, Mantenimiento y Cierre de Rellenos Sanitarios. Gutierrez Ledesma, V. 2010

10.8 CAPÍTULO 8: CLAUSURA Y POST-CLAUSURA

- [1] Banco Mundial, documento de trabajo 426 del Banco Mundial, elaborado por Philip Rushbrook y Michael Pugh. 1999
- [2] Diseño de rellenos sanitarios, Robayo C. – Bogotá 2012.
- [3] BID: Insumos para la definición de la Disposición Final de Residuos mediante Relleno Sanitario. Vega W., Paez T.

10.9 CAPÍTULO 9: ANEXOS

- [1] The Fukuoka Method <https://kommusuri.files.wordpress.com/2015/08/fukuokawastemanagementmethod.pdf>
- [2] George Tchobanoglous “Handbook of solid waste management”. Segunda edición, 2004.
- [3] CSI, Pittamiglio – Información de base para el diseño de un plan estratégico de residuos sólidos (2011).
- [4] Environmental Guidelines: Solid Waste Landfills, Second edition 2016, Australia.
- [5] Manual de construcción y operación de rellenos sanitarios en Honduras.
- [6] V. Córdoba, G. Blanco y E. Santalla - “Modelado de la generación de biogás en rellenos sanitarios. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires UNCPBA.
- [7] SCS Engineers – Pre-Feasibility Study, Montevideo – 2005.
- [8] Robén E. “Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios Municipales”, Loja Ecuador.