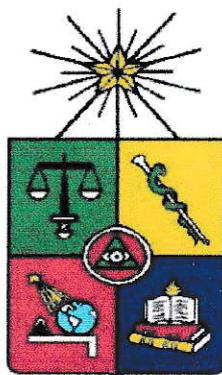


UC14-FC
Q. Ambiental
1828
c. 1

PROPUESTA PARA EL MANEJO DE LODOS GENERADOS POR LAS
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS SERVIDAS DE LAS
LOCALIDADES DE POBLACIÓN Y SANTA CRUZ, VI REGIÓN



Seminario de Título

entregado a la

Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile

en cumplimiento parcial de los requisitos

para optar al título de

QUIMICO AMBIENTAL

Libby Andrea Morales Avila

Director Seminario de Título: Lautaro Romo Romo

Profesor Patrocinante: Dr. Raúl G. E. Morales Segura

Junio, Año 2002

Quiero expresar mi agradecimiento a ESSEL S.A, en especial a Sergio Maldonado y Pablo Ortiz por el apoyo y dedicación que me brindaron. Y por supuesto, a mi familia....

ÍNDICE DE MATERIAS

INTRODUCCIÓN.....	1
MARCO TEÓRICO.....	5
1 TRATAMIENTO DEL AGUA Y LODO RESIDUAL.....	5
1.1 PRE -TRATAMIENTO.....	8
1.2 TRATAMIENTO SECUNDARIO.....	8
1.3 DESINFECCIÓN.....	9
1.4 TRATAMIENTO DE LODOS.....	10
1.4.1 ORIGEN Y POSIBLES DESTINOS DE LOS LODOS.....	10
1.4.2 POTENCIALES PROBLEMAS DE LOS LODOS.....	13
1.4.3 OTROS LODOS.....	19
2 ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN DE LOS LODOS.....	21
2.1 COMPOSTAJE.....	21
2.1.1 OPCIONES DEL COMPOSTAJE.....	22
2.1.2 ETAPAS DEL PROCESO DE COMPOSTAJE.....	24
2.1.3 TÉCNICAS DE COMPOSTAJE.....	26
2.2 MONO - RELLENO.....	30
2.2.1 INSTALACIÓN DE UN RELLENO.....	30
2.2.2 DISEÑO DEL RELLENO.....	30
2.2.3 MÉTODOS DE RELLENO.....	32
MATERIALES Y MÉTODO.....	37
RESULTADOS.....	42
1 TRATAMIENTO DEL AGUA Y LODO RESIDUAL.....	42
1.1 PRODUCCIÓN DE LODOS.....	42
1.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS.....	44
1.2.1 ANÁLISIS DE PELIGROSIDAD.....	44
1.2.2 ANÁLISIS FÍSICO - QUÍMICOS.....	45
1.2.3 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO.....	49
1.2.4 ENSAYOS ECOTOXICOLÓGICOS.....	51
2 ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN DE LOS LODOS.....	54
2.1 COMPOSTAJE.....	54
2.1.1 EXPERIENCIA PILOTO DE "COMPOSTAJE".....	54
2.1.2 ORGANIZACIÓN Y SUPERVISIÓN DE LA PLANTA.....	60
2.2 MONO - RELLENO.....	63
2.2.1 INSTALACIÓN DEL RELLENO CON ZANJAS.....	63
2.2.2 PROCEDIMIENTOS ESPECÍFICOS DE INSTALACIÓN DEL MÉTODO.....	66
2.2.3 PROCEDIMIENTOS GENERALES DE FUNCIONAMIENTO.....	67
2.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS ALTERNATIVAS.....	70
2.3.1 FLUJO DE COSTOS.....	71

DISCUSIÓN.....	73
CONCLUSIÓN.....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:	Patogenia y enfermedad causada por organismos patógenos.....	15
Tabla 2:	Supervivencia de los organismos patógenos.....	16
Tabla 3:	Ventajas y desventajas asociadas a las alternativas de disposición de los lodos.....	18
Tabla 4:	Composición media de lodos de depuradoras, Francia.....	19
Tabla 5:	Condiciones relevantes para el lodo y el sitio según el sub-método de zanja angosta	35
Tabla 6:	Relación lodo/material soporte en pilas experimentales de "compostaje".....	40
Tabla 7:	Estimación de la producción de lodos en la planta de tratamiento de aguas servidas de Población.....	43
Tabla 8:	Estimación de la producción de lodos en la planta de tratamiento de aguas servidas de Santa Cruz.....	43
Tabla 9:	Resultados de los análisis de peligrosidad realizados a muestras de lodo de Población y Santa Cruz.....	44
Tabla 10:	Resultados de los análisis físico - químicos realizados a muestras de lodo de Población y Santa Cruz.....	45
Tabla 11:	Resultados de los análisis microbiológicos realizados a muestras de lodo de Población y Santa Cruz.....	49

Tabla 12: Resultados de los ensayos ecotoxicológicos realizados a muestras de lodo de Población y Santa Cruz.....	52
Tabla 13: Temperaturas alcanzadas en las pilas de compostaje "experiencia piloto"....	55
Tabla 14: Coliformes fecales en muestras de "compost".....	58
Tabla 15: Contenido de Coliformes fecales en lodo de Santa Cruz.....	59
Tabla 16: Costos planta de "compostaje".....	70
Tabla 17: Costos mono - depósito.....	71
Tabla 18: Flujo de costos planta de compostaje.....	72
Tabla 19: Flujo de costos mono - depósito.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Ubicación geográfica del estudio.....	2
Figura 2:	Esquema general planta de tratamiento de Población.....	6
Figura 3:	Esquema general planta de tratamiento de Santa Cruz.....	7
Figura 4:	Diagrama de flujo general para el tratamiento y evacuación del lodo.....	11
Figura 5:	Esquema general del proceso de compostaje en hilera.....	27
Figura 6:	Ejemplos de taludes posibles de realizar en una zanja.....	32
Figura 7:	Sección transversal de una zanja angosta típica.....	34
Figura 8:	Gráfico de temperaturas en pilas de compostaje "experiencia piloto".....	57
Figura 9:	Esquema general para la distribución de la planta de compostaje.....	62
Figura 10:	Esquema general del relleno con zanjas propuesto.....	64
Figura 11:	Terrenos destinados a uso agrícola en la sexta región	75

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1:	Planta de tratamiento de aguas servidas de Población.....	6
Fotografía 2:	Planta de tratamiento de aguas servidas de Santa Cruz.....	7
Fotografía 3:	Pila experimental de compostaje N° 2.....	56

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1	81
NORMATIVA NACIONAL	82
A. Anteproyecto de reglamento para el manejo de lodos no peligrosos.....	82
NORMATIVA INTERNACIONAL.....	97
A. Contenido máximo de elementos traza aceptados en lodos de uso agrícola.....	97
B. Concentraciones máximas de microcontaminantes en el suelo, a partir de las cuales se prohíbe el uso agrario de lodos.....	99
C. Requisitos microbiológicos para lodos Clase A y Clase B, E.P.A (1992).....	100
D. Requisitos que debe tener un compost de calidad según la Organización Mundial de la Salud (O.M.S, 1985)	101
E. Concentraciones máximas permisibles en lixiviados provenientes de depósitos de lodos (sin impermeabilización)	102
ANEXO 2	103
TÉCNICAS DE COMPOSTAJE	104
A. Compostaje en pilas estáticas.....	104
B. Compostaje en pilas estáticas aireadas.....	104
C. Compostaje en reactor.....	108
FACTORES CRÍTICOS EN LA PRODUCCIÓN DE COMPOST	111
A. Definición y procedimientos de control.....	111
ANEXO 3	116
MÉTODOS DE RELLENO.....	117
A. Relleno de área.....	117
B. Eliminación conjunta.....	119
CONSIDERACIONES DEL SITIO PARA EL RELLENO.....	120
PROTECCIONES AMBIENTALES INVOLUCRADAS EN UN RELLENO	124
A. Control de la lixiviación.....	124
B. Control de gas	129
C. Manejo de aguas lluvias.....	130
D. Caminos de acceso	130
E. Otras características del diseño de un relleno con lodos residuales urbanos	131
MONITOREO.....	133
A. Monitoreo de aguas subterráneas	133
B. Monitoreo de aguas superficiales.....	135
C. Monitoreo de gas.....	136
CLAUSURA DEL SITIO DE RELLENO.....	137
A. Procedimientos para clausurar.....	137
B. Características del sitio de relleno clausurado.....	138

RESUMEN

La Empresa de Servicios Sanitarios del Libertador (ESSEL.S.A) está encargada de producir y distribuir el agua potable en la VI región, además de recolectar y tratar las aguas servidas que en ella se generan. En este momento, cuenta con 19 plantas de tratamiento de aguas servidas en operación, correspondiendo 7 de ellas a lagunas aireadas, 5 a lagunas asistidas por oxígeno, 5 a lagunas facultativas y 2 a plantas convencionales del tipo lodos activados modalidad aireación extendida, éstas últimas pertenecientes a las localidades de Población y Santa Cruz, provincia de Colchagua.

El tratamiento con lodos activados consiste, básicamente, en mezclar lodos bacteriológicamente activos con el agua residual que proviene del tratamiento primario o pre -tratamiento en un estanque aireado, de tal forma que los microorganismos existentes puedan lograr la remoción de parte de la materia orgánica presente en el agua residual. El lodo activado ha sido producido previamente por aireación de sucesivas cantidades de aguas servidas y mantenido activo mediante aireación, ya sea en contacto con el agua residual o en forma aislada. Al finalizar el tratamiento de las aguas servidas se generan dos corrientes principales, el efluente líquido y los lodos, sólidos obtenidos como residuos.

Mediante el tratamiento con lodos activados, las plantas de tratamiento de aguas servidas de Población y Santa Cruz generan, respectivamente, 1,5 y 4 m³/día de lodos que tienen que ser evacuados del lugar tanto para evitar problemas de salubridad como de acopio, debiendo ser dispuestos en un terreno de la empresa porque la autoridad competente (Servicio de Salud, VI región) negó la posibilidad de disponerlos en un vertedero autorizado. Sin embargo, la iniciativa tomada por la empresa nuevamente ha sido rechazada por la autoridad, pues el manejo del lodo y las precauciones ambientales efectuadas en el terreno han sido deficientes. Por esta razón, la Empresa de Servicios Sanitarios del Libertador se propuso hacer un estudio que ayude a solucionar los problemas existentes y a cumplir a futuro con las especificaciones del reglamento para el manejo de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de aguas una vez que entre en vigencia. Este estudio tiene por objetivo principal

proponer alternativas para el manejo del lodo generado por las plantas de tratamiento de aguas servidas de Población y Santa Cruz que se encuentren dentro de las posibilidades expuestas en el anteproyecto de reglamento para el manejo de lodos mencionado anteriormente, de tal forma que los cambios que se produzcan en el manejo actual del lodo no vayan en desmedro de lo estipulado en el reglamento.

El estudio realizado cuenta con una descripción del tratamiento de las aguas servidas, del lodo generado (mediante una caracterización físico - química y microbiológica) y de los potenciales problemas asociados a su manejo. Más adelante, se presenta una breve reseña de las alternativas de manejo más factibles de adoptar, como es la utilización del lodo en el "Compostaje", proceso de degradación en que la materia orgánica alcanza un producto final estable que puede ser utilizado como acondicionador de suelos por su contenido en macronutrientes como N, P y K, y la disposición final del lodo en un mono - relleno, de la cual no se puede obtener un beneficio, pues consiste solamente en crear una instalación en el suelo que permita depositar los lodos generados en forma controlada. Finalmente, se evaluaron económicamente las alternativas mencionadas, teniendo como resultado que la opción más viable para la empresa consiste en disponer los lodos en un mono - relleno, ya que sólo de ésta forma se cumple uno de los objetivos principales de toda empresa, abaratar costos. Sin embargo, la utilización del lodo en la agricultura, previo proceso de compostaje, representa la alternativa más atractiva tanto en el aspecto social como ambiental; socialmente, porque un proyecto de esta envergadura mejora la imagen de la empresa y minimiza el rechazo de la población, sobre todo si el producto que se obtiene representa utilidad para la agricultura, actividad que se desarrolla mayormente en el lugar (ya que del 26,5% de los terrenos agrícolas pertenecientes a la superficie total de la región el 37% pertenece a la provincia de Colchagua). Y amigable ambientalmente, porque se trata de mantener un equilibrio de nutrientes en el suelo para evitar su degradación, proporcionando de esta forma todos los elementos necesarios para una buena producción vegetativa. Además es posible tener una producción limpia de "compost" con un control adecuado del proceso, por lo que los problemas ambientales debieran estar ausentes.

INTRODUCCIÓN

La comuna de Santa Cruz se encuentra ubicada en el valle transversal formado por el río Tinguiririca, en la hoya del río Rapel. La ciudad, con una población de aproximadamente 20.000 habitantes, se ubica en la zona intermedia de la subcuenca del estero Chimbarongo, que la cruza por el norte y el estero Guirivillo que la cruza por el centro, dividiendo a la ciudad en tres sectores. Esta comuna se emplaza a 95 Km al sur poniente de Rancagua y a 40 Km. de San Fernando.

La localidad de Población con aproximadamente 1.500 habitantes pertenece a la comuna de Peralillo, y se encuentra ubicada a 65 Km al poniente de San Fernando por la ruta que conduce a Pichilemu (Ruta I-50).

Ambas comunas pertenecen a la provincia de Colchagua, VI región del Libertador Bernardo O'Higgins (ver fig. 1)

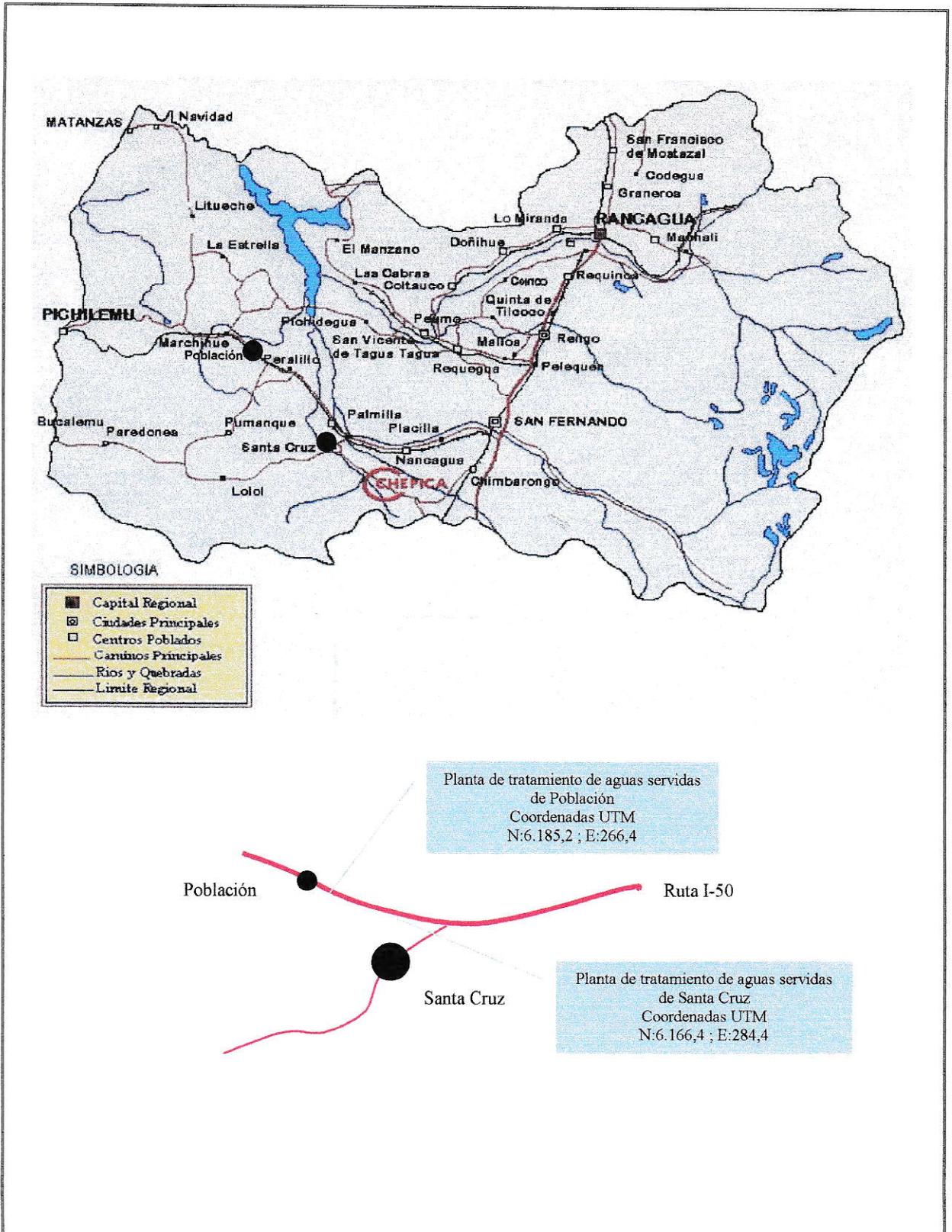
Esta zona se clasifica como cultivos de riego, referidos principalmente a siembras de trigo, arroz, maíz y plantaciones de vid (Toledo y Zapater. 1991).

El clima es templado cálido con estación seca prolongada, con rasgos continentales que se expresan en la temperatura media, la que varía entre los 12 y 15 grados celsius (Toledo y Zapater. 1991).

Tanto Población como Santa Cruz cuentan con suministro de agua potable proporcionado por la Empresa de Servicios Sanitarios El Libertador (ESSEL S.A.). Los sistemas de agua potable captan el agua de las fuentes naturales de suministro, las purifican (si es necesario) y las entregan al consumidor.

Las aguas servidas están constituidas, esencialmente, por agua potable ya utilizada por la comunidad (aproximadamente el 80% del agua suministrada), la cual se puede colectar junto con las aguas lluvias (alcantarillados combinados) o bien, se conduce independientemente por medio de otro colector, mientras que las lluvias se vierten a un sistema separado de alcantarillado construido para este fin.

Figura 1: Ubicación geográfica del estudio, VI región.



Antiguamente las aguas servidas recolectadas con las redes de alcantarillado eran dispuestas directamente en los cauces de aguas superficiales sin tratamiento alguno, empeorando la calidad de éstos, y poniendo en peligro la salud de la población, debido a que el riego agrícola se realiza con agua proveniente del curso receptor.

En la actualidad, cada una de estas localidades dispone de una planta de tratamiento de aguas servidas proporcionada por la misma empresa, las cuales tienen la finalidad de abatir la contaminación que éstas presentan, cumplir la normativa vigente y mejorar la calidad de los cauces de agua superficial existentes en la zona.

Cuando las aguas servidas llegan a la planta de tratamiento son procesadas hasta obtener dos corrientes finales, una consistente en aguas claras que son dirigidas a un cauce de agua superficial, con una composición que cumple con los requerimientos especificados en la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales (además de cumplir en el curso receptor la NCh 1333 Of.1978); y la otra compuesta por lodos, sólidos orgánicos e inorgánicos generados en el tratamiento de las aguas servidas, que se encontrarán regulados por el nuevo reglamento para manejo de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de aguas que está en trámite. Los lodos son tratados para su disposición, teniendo dos objetivos básicos: disminuir el volumen de material que va a ser manejado mediante la eliminación parcial o total de la porción líquida y descomponer la materia orgánica muy putrescible en compuestos orgánicos e inorgánicos relativamente estables o inertes, de los cuales puede separarse el agua con mayor facilidad. Por lo tanto, el tratamiento previo facilita la forma de disposición.

En este momento, la forma de disposición de los lodos generados por las plantas de tratamiento de aguas servidas de Población y Santa Cruz es incierta, es un problema que se ha tratado de enfrentar en forma reactiva una vez que han entrado en funcionamiento estas plantas, lo que en conjunto con la falta de experiencia ha llevado a un atraso con respecto a estudios y toma de decisiones sobre el tema.

Inicialmente y de acuerdo a lo señalado en la Evaluación de Impacto Ambiental, se había propuesto disponer los lodos en el vertedero Colihues La Yesca ubicado en la comuna de Requinoa, VI región, el cual cuenta con un moderno sistema de tratamiento de residuos sólidos urbanos. Según el Anteproyecto de reglamento para el manejo de lodos no peligrosos

generados en plantas de tratamiento de aguas es posible considerar la disposición de los lodos en vertederos bajo ciertas condiciones; sin embargo, el Servicio de Salud (VI región) ha negado rotundamente esta petición por parte de la empresa, basando su justificación en la inexistencia de vertederos autorizados para recibir estos lodos. Por lo que ESSEL S.A. se ha visto en la necesidad de sacar los lodos generados en sus plantas de tratamiento y disponerlos en un terreno perteneciente a la planta de tratamiento de Palmilla, sin contar con las autorizaciones correspondientes, además de no contemplar el cuidado ambiental del lugar. Todo esto ha causado una serie de multas por parte de los fiscalizadores.

La solución consiste básicamente en encontrar una vía que permita la evacuación de los lodos generados en estas plantas de tratamiento.

Ante esto, esta memoria se plantea como objetivo proponer alternativas para la utilización y/o disposición final de los lodos generados por las plantas de tratamiento de aguas servidas de Población y Santa Cruz, apoyando dicha propuesta en una evaluación técnica, social y económica.

El estudio se centra, principalmente, en la descripción del tratamiento de las aguas servidas a partir de las cuales se generan los lodos, la cuantificación y caracterización de éstos, además de las vías alternativas de disposición y/o utilización tales como compostaje, depósito en tierra o incineración que serán evaluadas también en función de las características del lodo. Si alguna de estas alternativas constituye la solución correcta para dar respuesta al problema existente, es algo que se debe determinar tras la evaluación cuidadosa de las ventajas y desventajas asociadas a cada una de ellas.

MARCO TEÓRICO

En esta sección del trabajo se presenta información que permite conocer y entender el recorrido que realizan las aguas potables una vez que son utilizadas por la población, el tratamiento que se les realiza, los residuos que se obtienen y las posibles alternativas de disposición de éstos.

1 TRATAMIENTO DEL AGUA Y LODO RESIDUAL

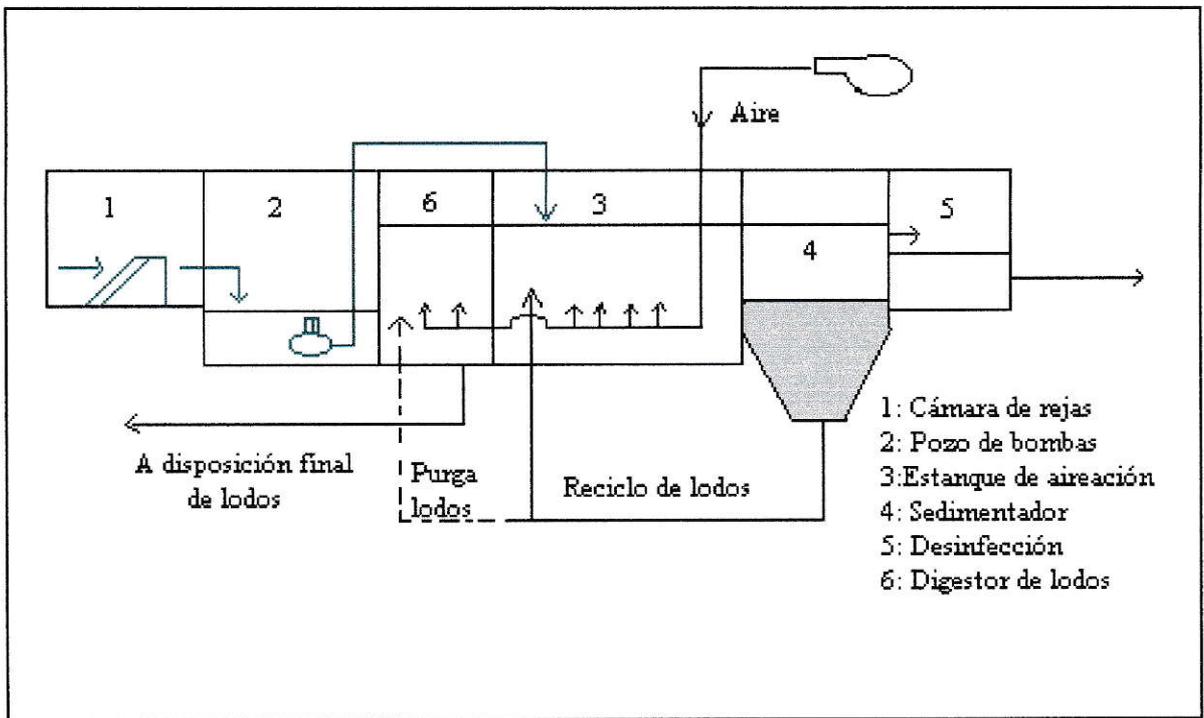
El tratamiento de las aguas servidas generadas en las localidades de Población y Santa Cruz se efectúa a través de plantas compactas, basadas en lodos activados, modalidad aireación extendida. Esta tecnología ha sido probada y aplicada a través de todo el mundo y se dispone de experiencias en literatura que dan cuenta de su eficiencia y parámetros de diseño.

En las figuras 2 y 3 se pueden observar los diagramas de flujo de las plantas de tratamiento de Población y Santa Cruz, respectivamente, en conjunto con sus fotografías.

Dentro de estas plantas de tratamiento se realizan 4 procesos básicos:

- Pre-tratamiento
- Tratamiento secundario
- Desinfección
- Tratamiento de lodos

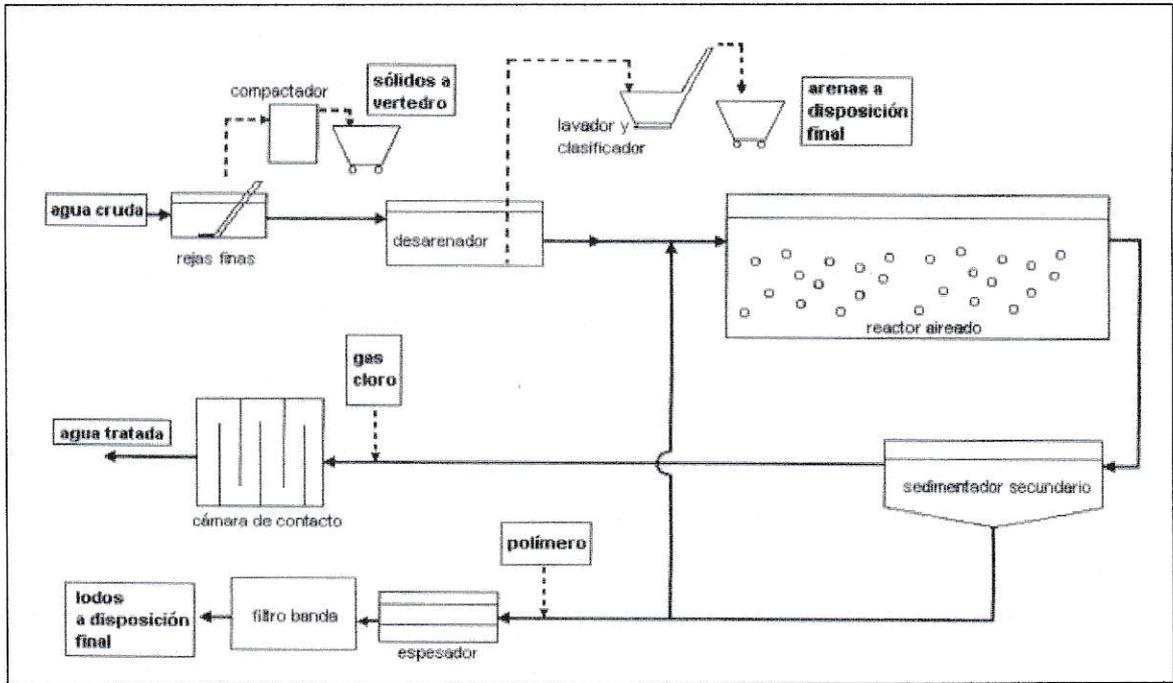
Figura 2: Esquema general planta de tratamiento de aguas servidas de Población.



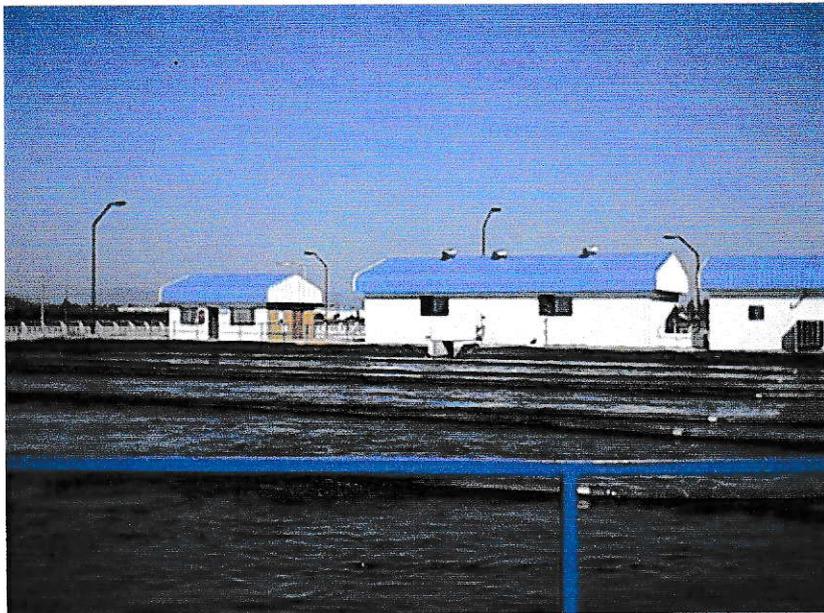
Fotografía 1: Planta de tratamiento de aguas servidas de Población.



Figura 3: Esquema general planta de tratamiento de aguas servidas de Santa Cruz.



Fotografía 2: Planta de tratamiento de aguas servidas de Santa Cruz.



1.1 PRE -TRATAMIENTO

- Cámara de rejillas

Se utiliza para retener sólidos relativamente grandes presentes en las aguas servidas crudas. El objetivo de estas operaciones es proteger los equipos de la Planta de Tratamiento de daños y obstrucciones provocadas por el atascamiento de sólidos gruesos y material fibroso.

A diferencia de Población, en Santa Cruz se encuentra además un desarenador tipo vortex. En esta unidad se separan las arenas, las que son extraídas mediante un sistema air-lift. Luego, estas son conducidas hasta un lavador-clasificador de arenas en donde se separa el agua.

1.2 TRATAMIENTO SECUNDARIO

El tipo de tratamiento considerado es un sistema de lodos activados, modalidad aireación extendida, el cual aprovecha los procesos vitales de los microorganismos presentes en el agua para producir la remoción de la materia orgánica.

El sistema consiste en desarrollar un cultivo bacteriano disperso en forma de flóculos (lodos activados) en un depósito agitado y aireado (reactor), alimentado con aguas servidas provenientes del pre-tratamiento. La agitación evita la sedimentación y homogeneiza la mezcla de los flóculos bacterianos y el agua residual (licor de la mezcla). La aireación tiene por objeto suministrar el oxígeno necesario a las bacterias y microorganismos aeróbicos que realizan el proceso de depuración. Después que el licor de mezcla sale de la cámara de aireación, es dispuesto en la cámara de sedimentación, en la que permanece en completa calma. Pasado un tiempo, se pueden observar dos fases: una que contiene todos los sólidos sedimentados (y que mediante la línea de retorno serán llevados al estanque de aireación y/o al digestor de lodos) y otra que contiene el líquido (libre de partículas) que será llevado hacia el sistema de desinfección.

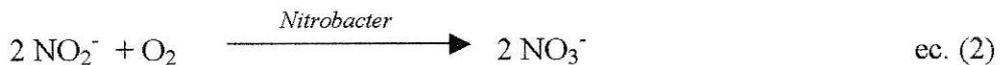
Una de las características de la aireación extendida consiste en los tiempos de retención hidráulicos mayores a los de otros procesos de lodos activados (mayores a 14 horas) y edades

de lodo superiores a 20 días. La edad del lodo corresponde al tiempo de retención celular en el sistema y es una de las variables de operación fundamentales de este tratamiento.

En los procesos de aireación extendida se produce, además, el fenómeno de nitrificación en el cual bacterias autotróficas (*Nitrificantes*) transforman el nitrógeno amoniacal en nitrito (*Nitrosomonas*), según la siguiente ecuación:



y a su vez, éste a nitrato (*Nitrobacter*):



Estas bacterias requieren de amonio y oxígeno disuelto en agua como sustrato para el desarrollo de materia celular.

Este proceso es llevado a cabo en ambas plantas de tratamiento. Pero, adicionalmente en Población se incorporó un digestor aireado, el cual tiene la finalidad de almacenar y /o digerir los lodos que han decantado en el sedimentador y que no han sido retornados al reactor. La digestión aeróbica del lodo es un proceso en el cual se lleva a cabo una aireación de una mezcla de lodo por un período de tiempo, reduciendo y estabilizando los lodos que se deben evacuar posteriormente mediante fermentaciones aeróbicas que consumen oxígeno y materia orgánica, siendo los principales residuos CO_2 , H_2O y lodos estabilizados (Seoáñez M. 1998).

1.3 DESINFECCIÓN

El proceso de desinfección tiene como objetivo el abatimiento de microorganismos patógenos en las aguas efluentes del tratamiento secundario. Para ello, se ha considerado un proceso de desinfección mediante la adición de hipoclorito de calcio para la planta de tratamiento de Población y cloro gas para la planta de tratamiento de Santa Cruz.

La desinfección se lleva a cabo en un estanque denominado cámara de contacto, donde se asegura un tiempo de retención hidráulico suficiente para que el agente desinfectante ejerza su acción germicida.

1.4 TRATAMIENTO DE LODOS

El tratamiento de los lodos tiene como principal objetivo disminuir el volumen de éstos por eliminación de agua, y descomponer la materia orgánica degradable en compuestos orgánicos e inorgánicos simples, relativamente estables o inertes, antes de su disposición, de forma tal que se minimicen los posibles daños producidos por la composición de éstos, la que variará dependiendo del origen del lodo.

1.4.1 ORIGEN Y POSIBLES DESTINOS DE LOS LODOS

En el proceso de tratamiento de las aguas servidas, se generan dos corrientes principales, el efluente líquido de las plantas de tratamiento y los lodos, sólidos obtenidos como subproducto.

La naturaleza de los sólidos contenidos en los lodos va a depender del proceso de tratamiento del que se originan, de tal modo que los lodos pueden ser:

Primarios: Constituidos por partículas sólidas depositadas en el fondo del decantador primario que contienen agua, sólidos inorgánicos finos y sólidos orgánicos.

Secundarios: Constituidos por partículas más finas provenientes de los tratamientos biológicos aeróbicos como son los lodos activados, filtros percoladores y contactores biológicos rotatorios.

Químicos: Son los que se generan por adición de sales de aluminio, hierro y cal para mejorar la remoción de sólidos suspendidos y la precipitación de fósforos.

En la figura 4 se presenta un diagrama general de los distintos procesos y operaciones unitarias que se pueden realizar en el proceso de tratamiento.

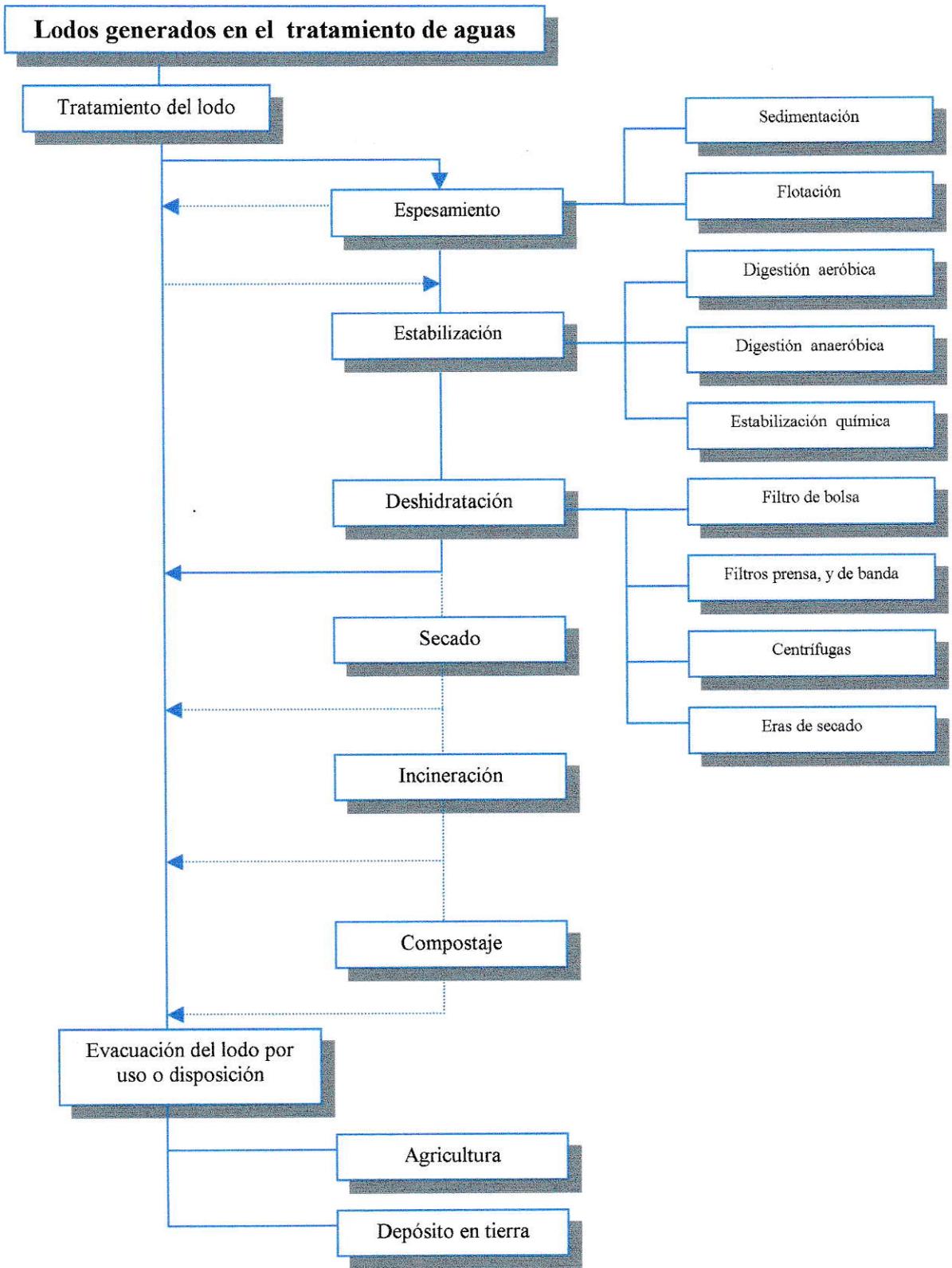


Figura 4: Diagrama de flujo general para el tratamiento y evacuación del lodo.

Como se puede observar en la figura 4, las combinaciones posibles para el tratamiento de lodos antes de su disposición o utilización son muy variadas, pero en este trabajo sólo se detallarán los procesos que se realizan en las plantas de tratamiento de aguas servidas de Población y Santa Cruz.

- **Espesamiento de lodos**

El espesamiento de lodos se realiza sólo en la planta de tratamiento de Santa Cruz, y constituye una ayuda si se considera que en esta planta no existe un digestor que proporcione una mayor concentración de sólidos.

Los lodos provenientes del sedimentador deben ser enviados directamente a un tambor rotatorio por alimentación interna y floculados mediante la adición de polímeros. El acondicionamiento del lodo se realiza con el expreso motivo de mejorar sus características de deshidratación.

Los sólidos retenidos son descargados continuamente hacia el sistema de deshidratación por aletas helicoidales distribuidas en el interior del tambor.

- **Deshidratado**

Los sistemas de deshidratación existentes en cada planta de tratamiento de aguas servidas son totalmente distintos, pero con la misma finalidad, la cual consiste específicamente en obtener un contenido de sólidos suficiente para un manejo adecuado del lodo.

En la planta de tratamiento de Santa Cruz se considera un filtro de banda para el deshidratado de los lodos. Esta unidad permite obtener una concentración de sólidos del 18%.

El filtro prensa de bandas consiste en dos bandas continuas colocadas una sobre otra, entre las cuales se introduce el lodo acondicionado. Este proceso consta de tres zonas. Primero, el lodo pasa a través de la zona de drenaje, donde se realiza la deshidratación por acción gravitatoria. A continuación, el lodo entra en la zona de compresión donde se le aplica una presión por medio de rodillos que se hallan en contacto con la banda superior. Finalmente, pasa a la zona de cizalladura, donde se aplican esfuerzos cortantes para llevar a

cabo la deshidratación final. Luego, el lodo deshidratado es extraído por medio de un rascador.

Las aguas retiradas del espesador y del filtro de banda, son retornadas al inicio de la planta.

En cambio, en la planta de tratamiento de Población, el lodo relativamente estabilizado en el estanque digestor aireado es enviado directamente mediante un sistema air-lift a la trampa de lodos (tolva superior), la cual distribuirá los lodos a tres sacos, los que dejarán escurrir el filtrado a una bandeja inferior, para luego ingresar en forma gravitacional a los estanques de aireación. Cuando los sacos se encuentran llenos con lodo, son retirados para su disposición.

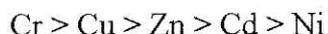
1.4.2 POTENCIALES PROBLEMAS DE LOS LODOS

En general, los dos problemas más importantes en los lodos son la concentración de metales pesados, que pueden reducir la fermentación en los digestores e inutilizar los lodos para uso en agricultura, y la existencia de organismos patógenos, que pueden ser arrastrados por lixiviados y puestos en contacto con verduras en fresco, en el caso de un mal sistema de abonado.

1.4.2.1 Efecto de la presencia de metales pesados

En relación con los metales pesados, deben señalarse los siguientes efectos:

- En la digestión la toxicidad de los metales pesados sobre las bacterias decrece en el siguiente orden (Astudillo P. & Díaz D. 1999):



- Las concentraciones de metales pesados que en la digestión pueden reducir la producción de metano en un 10% expresada en g/g de S.V son (Astudillo P. & Díaz D. 1999):

Cr	$3,37 \times 10^{-3}$
Cu	$13,48 \times 10^{-3}$
Zn	$3,37 \times 10^{-3}$
Ni	$7,27 \times 10^{-3}$
Cd	$9,00 \times 10^{-3}$

- El mercurio es una de los metales que ha sido objeto de un gran interés y divulgación. Los microorganismos convierten el ión mercurio a metilmercurio (CH_3Hg) o dimetilmercurio [$(\text{CH}_3)_2\text{Hg}$]. El metilmercurio se absorbe en los tejidos de los peces, provocando que el consumo de éstos no sea adecuado. El metilmercurio presente en los peces se absorbe en los tejidos de los seres humanos y puede concentrarse en ciertos órganos vitales tales como el cerebro y el hígado (Ramalho R.S. 1996).

Por otro lado, también es importante la presencia de los metales en el caso de la utilización del lodo en terrenos agrícolas, debido a que los metales traza y compuestos orgánicos quedan atrapados en el suelo y crean posibles riesgos tóxicos para plantas, animales y hombre. El metal que mayor atención merece es el Cadmio, puesto que se puede acumular en las plantas hasta alcanzar niveles que resultan tóxicos para el hombre y para los animales, sin llegar a ser tóxicos para las plantas.

1.4.2.2 Efecto de la presencia de organismos patógenos

La materia orgánica degradable presente en el lodo no estabilizado puede originar problemas de olores y atraer vectores (mosquitos, roedores, etc.) a los lugares de aplicación.

Los patógenos (bacterias, virus, protozoos y huevos de gusanos parásitos) se concentran en el lodo y pueden propagar enfermedades en caso de que exista contacto con el hombre. Para cumplir los límites previstos, el contenido en materia orgánica y patógenos se debe reducir considerablemente antes de la aplicación al suelo mediante procesos de tratamientos previos.

En cuanto a los organismos patógenos que pueden aparecer en las aguas residuales y lodos de las estaciones depuradoras, pueden destacarse los que se encuentran en la tabla 1:

Tabla 1: Patogenia y enfermedad provocada por organismos patógenos.

Grupo	Género	Enfermedad
Bacterias	<i>Salmonella</i> <i>Shigella</i> <i>Escherichia</i> <i>Vibrio</i> <i>Clostridium</i> <i>Leptospira</i> <i>Mycobacterium</i>	Tifus – Paratífus – Enteritis Disenteria – Paradisenteria Enteritis (origen patógeno) Cólera – Paracólera – Enteris Gangrena – Tétanos – Botulismo Leptospirosis Tuberculosis – Tuberculosis atípica
Virus	<i>Polivirus</i> <i>Coxsackievirus A</i> <i>Echovirus</i> <i>Adenovirus</i> <i>Rotavirus</i> <i>Reovirus</i> <i>Hepatitis virus A</i>	Poliomelitis – Enteritis Dolores de cabeza y musculares Diarreas – Hepatitis Fiebre – Infecciones respiratorias – Enteritis – Conjuntivitis – Afecciones nerviosas Gastroenteritis infantil Gripe – Diarreas – Virus Hepatitis agudas o crónicas
Protozoos	<i>Entamoeba</i> <i>Giarda</i>	Disentería amebiana Amebiasis o disentería amebiana
Tremátodos	<i>Schistosona</i>	Equistosomiasis
Céstodes	<i>Taenia</i>	Tenis – Ictericosis
Nemátodos	<i>Ascaris</i> <i>Ancliylostoma</i>	Ascariasis Anquilostomiasis

Fuente: Hernández A. 1996.

A la existencia de estos organismos y sus efectos, debe unirse el problema que plantean por su supervivencia en las aguas, vegetales y suelos. Tiempos que figuran en la siguiente tabla:

Tabla 2: Supervivencia de los organismos patógenos.

Organismo	Medio	Tiempo de supervivencia (días)
<i>Ascaris Ova</i>	Vegetales	27 – 35
	Suelo	730 – 2010
<i>Entamoeba histolytica</i>	Vegetales	3
	Suelo	6 - 8
	Agua	60 ⁺
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	Suelo	180 ⁺
	Hierba	10 – 40
	Agua	30 – 90
<i>Salmonella (spp.)</i>	Vegetales	3 – 40 ⁺
	Suelo	15 – 280 ⁺
	Pasto	200 ⁺
	Hierba	100 ⁺
<i>Salmonella typhi</i>	Vegetales	10 – 53
	Lechuga	18 – 21
	Suelo	2 – 120
	Agua	87 – 104
<i>Shigella (spp.)</i>	Vegetales	7
	Agua	42
<i>Shigella sonnei</i>	Tomates	2 – 10
<i>Stretococcus faecalis</i>	Suelo	26 – 77
<i>Vibrio cholerae</i>	Vegetales	5 – 14
<i>Vibrio comma</i>	Agua	32
<i>Poliovirus</i>	Agua	20

Fuente: Astudillo P. & Díaz D. 1999.

Independientemente de los problemas que pueden traer asociados los lodos por su composición, es necesario establecer una vía que permita su utilización y/o disposición final de acuerdo a la normativa existente (ver anexo 1).

Para evacuar el lodo de las plantas de tratamiento de aguas servidas se han considerado alternativas como el mono - depósito, la incineración y el uso en la agricultura (mediante compost elaborado a partir de lodo). Se debe dejar claro que a pesar de que estas dos últimas alternativas son parte del tratamiento del lodo, como se muestra en la figura 4, no forman parte del tratamiento del lodo dentro de las plantas de tratamiento de aguas servidas en estudio, pudiendo ser consideradas como vías de evacuación. Las razones principales para tomar en

cuenta estas alternativas son porque constituyen una forma de eliminar posibles problemas ocasionados por patógenos que se encuentran en el lodo, además aumentan su estabilidad, con lo cual se evita la atracción de vectores y se contribuye, al mismo tiempo, con el cuidado de la salud de la población. Se debe mencionar también que ambos procesos llevan a una reducción importante del volumen de lodos, ventaja mayoritaria en la incineración.

Una vez que se ha llevado a cabo la incineración o el compostaje del lodo se debe establecer la utilización y/o disposición del producto generado. En el caso del compostaje existen potenciales interesados en obtener el compost producido, principalmente municipalidades que necesitan agregar nutrientes a áreas verdes de su cuidado o simplemente para colaborar con la gente de escasos recursos, proporcionándoles un material con características que permitirán mejorar la calidad de sus suelos degradados.

La incineración en cambio, proporcionará como producto sólo cenizas, las cuales deberán ser dispuestas finalmente en algún relleno o esparcidas en suelos agrícolas o degradados, casos que no han sido considerados en el Anteproyecto de Reglamento Para el Manejo de Lodos No Peligrosos Generados en Plantas de Tratamiento de Aguas, ya que no se hace mención alguna sobre la incineración, pero es una alternativa considerada en otros países.

Se debe tener en cuenta que la disposición final o utilización del lodo depende en cierto modo del tipo de tratamiento al que se someta, lo que claramente está condicionado por algún proceso mostrado en el diagrama de la figura 4. Por ejemplo, cuando se quiere utilizar el lodo en agricultura (aplicándolo directamente sobre el suelo o bajo éste) lo menos que se puede esperar es que se encuentre estabilizado, pasando a segundo plano la deshidratación por razones de uso, pero llega a ser prioritaria a medida que se quieren abaratar costos por transporte. En cambio, si se quiere practicar la incineración, el depósito en tierra o el compostaje la deshidratación facilita enormemente el manejo del lodo (además disminuye los costos por transporte), pasando a segundo plano la estabilización del lodo.

En la siguiente tabla se presentan las ventajas y desventajas de cada una de las alternativas planteadas para la utilización y/o disposición de los lodos, las cuales deben ser consideradas al momento de elección.

Tabla 3: Ventajas y desventajas asociadas a las alternativas de disposición de los lodos.

Alternativa	Ventajas	Desventajas
Compostaje	<ul style="list-style-type: none"> • Disminuye las necesidades de materia orgánica de los suelos y contribuye a su recuperación. • Es una alternativa para las necesidades del sector agrícola y comercial en el campo de los productos que aportan materia orgánica a los suelos. • Optimiza los recursos existentes en cada zona al aprovechar los residuos que se producen en ellas. • Reduce la tasa de ocupación de los vertederos, al darles un destino útil a parte de los residuos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Si no se aplica bien puede llevar a tener problemas en el suelo, debido a que un exceso puede provocar problemas por acumulación de metales pesados. • Hay que realizar análisis cada cierto tiempo del producto para asegurar su calidad, lo que implica un costo adicional. • El proceso demora meses, además puede variar de acuerdo a las estaciones del año.
Depósito en tierra	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo de operación (poca tecnología). • Se puede sacar un provecho económico en caso de habilitar para uso externo. • No existe dependencia externa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso extensivo de terreno. • Tiene vida útil limitada. • Se debe establecer un plan de seguimiento.
Incineración	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción del volumen (lo que disminuye los costos de recolección y transporte). • Inertización completa del lodo (higienización y eliminación del potencial de putrefacción, atracción de vectores, etc.). • Un incinerador puede producir un residuo de cenizas que contenga una cantidad despreciable de materiales orgánicos y por consiguiente sea más aceptable como material de relleno. • Para depositar los residuos hace falta menos suelo que para su depósito en vertederos. • Un incinerador no se ve directamente afectado por el clima o por tiempo meteorológicamente anormal. • Se puede recuperar energía mediante el intercambio de calor procedente de los gases calientes de combustión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Supone un desperdicio energético, cuando la única finalidad es la incineración del lodo. • Los productos de la combustión contaminan la atmósfera. • El lodo debe ser secado antes de su incineración. • Se debe encontrar un lugar adecuado donde disponer las cenizas. • Altos costos asociados al incinerador, en cuanto a equipo, combustible (uso permanente), reparación y mantención. • Tiene una baja aceptación pública, presentándose problemas de selección de sitio para su aprobación. • Exige normas para el funcionamiento demasiado estrictas, lo que implica mayor costo de inversión.

Claramente, la incineración constituye una alternativa compleja, debido al gran costo de inversión que debe asumir la empresa para un funcionamiento adecuado del equipo, esto es, mantención y cumplimiento de una normativa estricta con respecto a las emisiones, sobre todo si se considera que la ubicación del incinerador debería encontrarse relativamente cerca de las localidades de Población y Santa Cruz, cuya principal actividad económica es la agricultura. Debido a lo expuesto anteriormente se descarta la posibilidad de implementar la incineración como vía alternativa para la eliminación o utilización del lodo. Por lo tanto, de ahora en adelante sólo se considerarán las alternativas de compostaje y depósito en tierra con sus respectivas técnicas y métodos.

1.4.3 OTROS LODOS

En la tabla 4 se presentan las características de los lodos generados en 7 plantas de tratamiento de aguas servidas de la región del Bio-Bio (Chile), según ESSBIO S.A; en 1 planta de tratamiento de aguas servidas de la región metropolitana, CEXAS - Melipilla (Chile), según Aguas Andinas (ex EMOS) y en 238 plantas de tratamiento de aguas servidas de Francia, según ADEME y Fertifond P.

Tabla 4: Composiciones medias de lodos de plantas de tratamiento chilenas y extranjeras.

Componente	CONTENIDO				Unidad
	ESSBIO S.A	Aguas Andinas (ex -EMOS)	Fertifond P	ADEME	
Fósforo total	0,55	-	6,4	-	% materia seca
Potasio	0,59	-	0,5	-	% materia seca
Nitrógeno total	6,5	-	1,3	-	% materia seca
COT	34,6	-	-	-	% materia seca
Cromo	37,6	41,8	176	80	ppm*
Plomo	16,0	108,1	492	133	ppm
Cobre	222	403,3	704	334	ppm
Cadmio	1,20	5,30	12	5,3	ppm
Níquel	14,6	20,8	58	39	ppm
Mercurio	0,34	1,90	6	2,7	ppm
Zinc	633	842,6	2.550	817	ppm
Selenio	0,84	< 5,0	-	7,4	ppm

* En este caso ppm es equivalente a la expresión mg/Kg. de lodo.

Fuente: CCHEN. 1996, Seoáñez M. 1999 Y AIDIS-CHILE. 2001.

Cabe señalar, que las características de los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas varían considerablemente de un lugar a otro, e incluso de una comunidad a otra, dependiendo tanto de las costumbres de las personas como de las características geográficas donde se emplacen.

Sin embargo, sólo a modo de referencia y sin buscar relaciones muy sustantivas, se puede decir que el contenido de metales de los lodos en estudio (expuestos en la tabla 10) se presenta en concentraciones más bajas que las de los lodos presentados en la tabla 4, igualmente estudiados para su aplicación a suelos, lo que deja abierta la posibilidad de utilizarlos en la agricultura según las concentraciones máximas para lodos de uso agrícola, presentes en el anexo 1. Generalmente, los problemas que se han presentado en el extranjero por la utilización de lodos de aguas servidas en suelos se han debido a un mal manejo de los lodos, específicamente por aplicación descontrolada, lo que a llevado a una acumulación de metales en los suelos.

En cuanto al contenido de macronutrientes (N, P, K), los lodos de Santa Cruz y Población presentan cantidades similares a las expuestas en la tabla 4, de acuerdo a lo expuesto en la tabla 10. Sin embargo, el contenido de materia orgánica se presenta un poco menor al tomar como referencia los lodos domiciliarios de ESSBIO S.A y de otros países, ya que según literatura estos últimos presentan entre un 80 - 90% de materia orgánica, basándose en el mismo tratamiento, lodos activados (Hernández A. 1996).

2 ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN DE LOS LODOS

De acuerdo a los antecedentes expuestos anteriormente, se excluye la incineración como medio de eliminación de los lodos, por lo que se proseguirá con el estudio detallado de las alternativas restantes, compostaje y disposición final en un mono - depósito (sección 2.1 y 2.2 respectivamente). La descripción de cada una de estas alternativas tiene como finalidad proporcionar los aspectos más relevantes que se relacionan estrechamente con las características del lodo, el costo económico asociado y el medio ambiente.

2.1 COMPOSTAJE

El "compostaje" es un proceso en el que la materia orgánica sufre una degradación biológica hasta alcanzar un producto final estable. El lodo compostado adecuadamente es un material tipo humus, higiénico y libre de características desagradables. Aproximadamente el 20 – 30% de los sólidos volátiles se convierten a dióxido de carbono y agua. Conforme se produce la descomposición de la materia orgánica contenida en el lodo, el "compost" se calienta hasta alcanzar temperaturas situadas en el intervalo de pasteurización (50-70°C), lo cual permite la destrucción de organismos patógenos entéricos. Un lodo bien compostado se puede emplear como un recurso de materia orgánica que mejora las propiedades físicas del suelo, además de proporcionar macro nutrientes tales como N, P, K, Ca, Mg y muchos de los micro nutrientes requeridos para el crecimiento de las plantas, o simplemente puede ser enviado a vertedero, cumpliendo siempre las limitaciones aplicables a los constituyentes del lodo (Metcalf. 1981).

Tres características distinguen al compostaje de otros procesos degradativos:

- El calor generado por la actividad microbiológica es suficiente para permitir que los microorganismos termofilicos dominen las poblaciones microbiológicas.
- Los niveles de oxígeno en la masa de compost se mantienen a niveles tales que el metabolismo aerobio se favorece y el dióxido de carbono y vapor de agua son los productos principales.

- El compostaje puede ser un proceso controlado en el cual el medio microbiológico se manipula para acelerar el proceso degradativo y reducir los organismos patógenos potenciales.

El "compostaje" en condiciones aeróbicas acelera la descomposición de la materia y da lugar a un mayor aumento de la temperatura (se produce el desprendimiento de hasta 20 veces más energía que bajo condiciones anaeróbicas), dando como resultado el desarrollo de una temperatura interna más alta y un mejor secado, suficiente para la destrucción de patógenos, además minimiza la producción de olores desagradables.

2.1.1 OPCIONES DEL COMPOSTAJE

El lodo puede ser convertido en compost tal como se obtiene al terminar su tratamiento, o bien en combinación con un material de enmienda (compostaje combinado).

2.1.1.1 Material de enmienda

El material de enmienda es un material orgánico que se añade al sustrato a compostar con la finalidad de obtener un producto de menor peso y aumentar el número de huecos para favorecer la aireación. Los materiales de enmienda también se pueden emplear para aumentar la cantidad de materia orgánica presente en la mezcla. El material ideal tiene baja densidad a granel, se degrada fácilmente y debe ser tan seco como sea posible. Características tales como tamaño de partícula, contenido de humedad y capacidad de absorción también son importantes.

A continuación se presentan 2 ejemplos de compostaje combinado:

- **Compostaje combinado con virutas de madera**

El compostaje combinado del lodo con virutas de madera requiere, generalmente, la deshidratación previa del lodo, antes de ser mezclado con el material de soporte (virutas de madera).

Los materiales de enmienda de uso más frecuente son aserrín, chips de madera, paja, compost reciclado y cáscaras de arroz. Pero el material más empleado son los chips de madera, que se pueden recuperar y reutilizar. Esto se debe a que los chips de madera ofrecen muchas ventajas importantes para el compostaje, tales como uniformidad en el tamaño, capacidad de absorción de humedad, fácil manipulación y carbono disponible.

El tipo preferido de chips de madera viene de árboles de madera dura. Cuando se usan chips de madera blanda, se absorbe demasiada humedad y debido a su estructura más débil, se deforman fácilmente cuando se comprimen (por lo general se aplastan).

- **Compostaje combinado con residuos sólidos**

El compostaje con residuos sólidos municipales generalmente no requiere la deshidratación. Los lodos de alimentación pueden tener un contenido de sólidos variables entre el 5 y 12%. Se recomienda que la mezcla de residuos sólidos con lodo sea en proporción 2 a 1, aunque puede mezclarse con cualquier cantidad de residuos sólidos con la condición de que el lodo se deshidrate adecuadamente. Los sólidos, deben sufrir una clasificación y trituración en un molino de martillos en forma previa a su mezclado con el lodo.

2.1.2 ETAPAS DEL PROCESO DE COMPOSTAJE

El proceso en una planta de compostaje puede agruparse en las siguientes etapas:

2.1.2.1 Recepción de residuos

Este sector comprende las instalaciones y los equipos de control de los flujos de entrada (residuos vegetales, restos de poda, residuos agroindustriales, pelos, aserrín y otros materiales). Según el tamaño y las características de la instalación, se requieren al menos de los siguientes equipos que permitan un manejo inicial de los residuos, antes de la selección:

- Pesa para camiones que ingresan con materia prima a la planta.

2.1.2.2 Selección y acondicionamiento

Esta etapa tiene por finalidad realizar una primera selección o limpieza de las materias primas que ingresan a la planta; algunos equipos pueden ser:

- Cinta de selección o limpieza

Sirve para eliminar cartones, papeles, plásticos, metales, vidrios, maderas, latas y otros materiales extraños.

- Separador magnético

Es utilizado para remover metales de menor tamaño que no han podido ser eliminados en la cinta de selección.

- Trituradores o molinos

Esos equipos tienen la finalidad de reducir las partículas gruesas, para facilitar el compostaje.

- Cedazo rotatorio

Es un equipo de sección circular o hexagonal, con el eje ligeramente inclinado y dotado de mallas o perforaciones en las paredes laterales. Su objetivo principal es separar los componentes de menor tamaño que salen por los lados.

2.1.2.3 Etapa de "compostaje"

El patio de "compostaje" o área de instalación donde se colocan los residuos para transformarse en compost debe estar pavimentado o cubierto con arcilla compactada, dotado de un sistema de captación de lixiviados, aguas lluvias y disponer además de un estanque de estabilización. En algunos casos esta área se ubica al aire libre y en otras bajo techo.

2.1.2.4 Tratamientos finales y almacenamiento

El tratamiento final del compost maduro consiste en tamizarlo para darle una menor granulometría y volverlo más manejable. Este tipo de manejo permite prensar y disponer en sacos, lo cual facilita su movilización y transporte. El almacenamiento de los productos finales debe hacerse en un galpón cubierto.

- Cernido o tamizado

Una vez que el proceso de compostaje ha llegado a término se produce una importante reducción de volumen respecto a lo que inicialmente se empezó a compostar (60 – 70%), pero también quedan materiales que no se han degradado, por lo tanto para homogeneizar el producto este se debe cernir.

- Envasado

Una vez tamizado, el material compostado puede ser envasado, vendido u ocupado directamente a granel.

2.1.3 TÉCNICAS DE COMPOSTAJE

Las técnicas de "compostaje" dan cuenta de las distintas condiciones en las que se puede llevar a cabo el proceso. Estas técnicas varían de acuerdo a la aireación del material a compostar, período de volteo y a la cantidad de "compost" requerida en el producto final.

Las principales técnicas de "compostaje" se mencionan a continuación y se describen en el anexo 2; la elección de cualquiera de ellas va a depender de los objetivos planteados por el productor, el producto que desea elaborar, de las necesidades del mercado, de la cantidad y tipo de material a procesar, del terreno disponible, de la complejidad operacional, del potencial para generar problemas medio ambientales y finalmente de la inversión que se esté dispuesto a realizar. Las 4 técnicas de compostaje conocidas son:

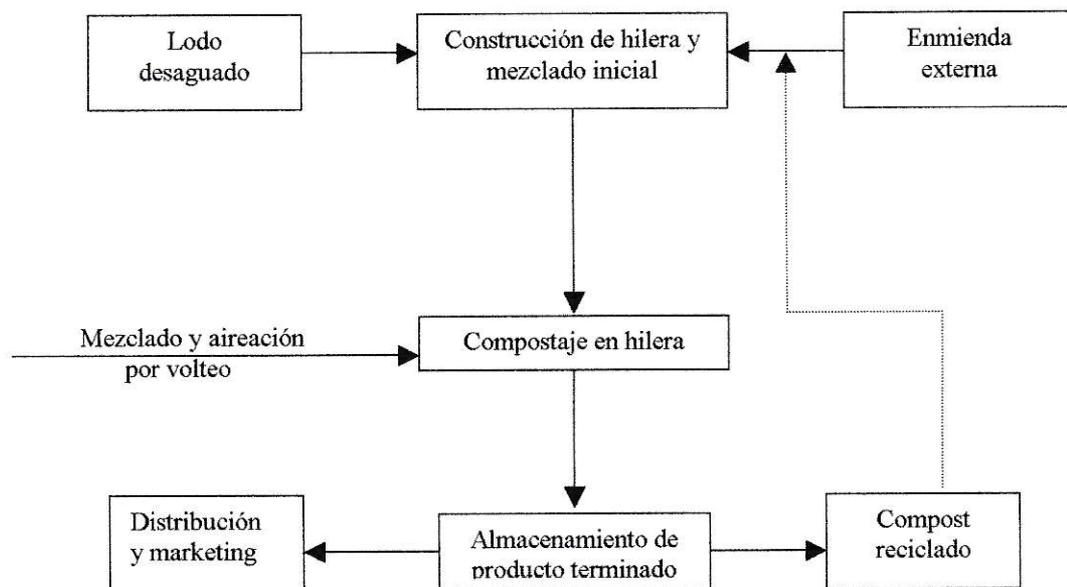
- **Compostaje en pilas estáticas**
- **Compostaje en pilas estáticas aireadas**
 - Pila individual
 - Pila Extendida
- **Compostaje en reactor**
 - Sistemas de flujo pistón vertical
 - Sistemas de flujo pistón horizontal
 - Reactores de lecho agitado
- **Compostaje en pilas de volteo o en hileras**

Económicamente hablando, existen técnicas que resultan más ventajosas y fáciles de adoptar que otras. Por lo tanto, de todas las técnicas mencionadas se ha seleccionado sólo una, que se cree servirá para implementarse en caso de elegir el compostaje como medio de utilización de los lodos. Para verificar la viabilidad de esta alternativa, se ha pensado en realizar una experiencia piloto de Compostaje, la cual tendrá como objetivo principal demostrar la factibilidad de utilizar lodos para producir compost, además de adquirir un perfil físico - químico y microbiológico del desarrollo del proceso. La técnica seleccionada para desarrollar el proyecto y la experiencia es "compostaje" en pilas de volteo, la cual se describe a continuación:

Compostaje en pilas de volteo o en hileras

Un esquema generalizado del proceso de hilera se muestra en la figura 5. Los pasos del proceso incluyen la construcción de hileras a partir de una mezcla de lodos y compost terminado reciclado (reciclo) o material de enmienda externo, mezclando (volteando) las hileras con equipo móvil y compostando durante varias semanas para producir un producto final estable.

Figura 5: Esquema general del proceso de compostaje en hilera.



Fuente: Astudillo P. & Díaz D. 1999.

Las hileras pueden construirse de variadas formas y la propia construcción juega un rol crucial en el éxito del proceso de compostaje. El método de construcción usado debe producir una hilera que tenga una porosidad y contenido de humedad adecuado y suficientemente larga para sostener la descomposición biológica termofílica.

Las longitudes de las hileras varían en un rango que va desde menos de 30 m a más de 245 m. La longitud de la fila depende de la cantidad y calidad diaria de lodos, razón de mezcla del material de enmienda y lodos, y del tamaño del campo. Para operaciones mayores

donde se dispone de un espacio adecuado de campo, es aconsejable compostar cada lote diario de lodos en una hilera separada de tal forma que cada lote pueda ser compostado y monitoreado adecuadamente. Las hileras adyacentes deberían espaciarse suficientemente como para permitir que un cargador frontal viaje entre ellas y limpie a fondo cualquier material depositado entre las hileras durante el volteado. Un espacio entre filas de aproximadamente 3 m normalmente es suficiente.

Las pilas deben ser volteadas en forma regular, ya sea con máquinas especialmente destinadas para este fin o en forma manual. Con el volteo de las pilas se persigue obtener los siguientes efectos:

- Mezclado
- Evitar compactación
- Intercambio gaseoso
- Crear nuevas superficies de ataque para los microorganismos
- Controlar la temperatura, pH y humedad
- Reducir el tamaño de la partícula
- Exponer los materiales de la hilera a altas temperaturas interiores para permitir una efectiva inactivación de patógenos.

Para proteger las pilas del exceso de humedad o de un secado extremo, se pueden proteger con telas especiales de material poroso al aire, pero debido al costo y trabajo adicional que esto significa, se evita muchas veces usarlas, por lo que desde el punto de vista del requerimiento de mano de obra, es conveniente reemplazar el uso de tela por techumbre, especialmente en zonas con alta pluviometría.

El ciclo de compostaje se considera completo cuando una hilera cumple con los objetivos operacionales de tiempo, temperatura y volteado, y satisface los criterios de calidad del producto en cuanto a humedad, densidad de patógenos, tamaño de partícula u otros factores (detalles sobre los factores críticos en la producción se encuentran en el anexo 2).

A continuación, se presentan las razones por las que se cree que la técnica seleccionada es la más conveniente:

- Debido a la pequeña producción de lodos se puede tener un estricto control sobre el manejo del proceso, por lo que puede llegar a ser tan eficiente como el compostaje en pilas estáticas aireadas.
- Provee un alto grado de destrucción de patógenos y una buena estabilización del producto.
- Tiene un costo relativamente bajo en comparación con las técnicas de compostaje en pila estática aireada y en reactor.
- Proporciona flexibilidad para manejar amplias variaciones en cantidad y calidad de lodos al día.
- Ambientalmente aceptable, ya que por ser un proceso aeróbico evita que se generen olores desagradables característicos de un proceso anaerobio, en donde se producen principalmente compuestos sulfurados y amoniacales, entre otros.
- Debido a que la pila se mantiene prácticamente aerobia permite un mejor control del olor que en las pilas estáticas.
- El sistema puede construirse al aire libre o totalmente encerrado, lo que dependerá de las preferencias de los usuarios y del grado de control de olor que se desee.

Sin embargo, existen algunas desventajas para la técnica seleccionada:

- Mayor requerimiento de terreno comparado con el compostaje en reactor.
- Potenciales problemas de olor si el sistema no es operado adecuadamente.
- En caso de que las instalaciones se encuentren descubiertas tanto las operaciones como el proceso se podrían ver afectados por el clima.
- A pesar de que el compostaje constituye una alternativa atractiva por ser en cierta forma un proceso ecológico, puede dejar de serlo al encontrar otras alternativas que sean menos costosas.

2.2 MONO - RELLENO

El depósito en tierra de los lodos consiste en crear una instalación en el suelo (mono –relleno o mono - fill) para la disposición final del lodo, la cual no debe generar problemas para la salud, seguridad pública y el medio ambiente. La disposición controlada de residuos en un relleno constituye una manera simple de eliminar los lodos generados en una planta de tratamiento de aguas servidas.

Desde el punto de vista de gestión, el relleno controlado se ajusta a las posibles fluctuaciones en la producción de los lodos, es decir, a la disminución o aumento de las toneladas de residuos que llegan a éste.

Por las razones antes expuestas es que se ha considerado como alternativa la construcción de un relleno de lodos para la disposición de los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas servidas de Población y Santa Cruz.

2.2.1 INSTALACIÓN DE UN RELLENO

Para que la instalación de un relleno sea efectiva se necesita de planes detallados que también consideren protecciones ambientales enfocadas a evitar daños en la Población y el medio ambiente circundante al relleno (ver anexo 3), además de una elección del equipo que sea compatible con las características del lodo, las condiciones del sitio y el método de relleno.

2.2.2 DISEÑO DEL RELLENO

El diseño del relleno consiste principalmente en determinar las siguientes variables:

- Profundidad, ancho y longitud de la excavación
- Espaciamiento
- Orientación
- Profundidad del relleno con lodo
- Grosor de la cubierta

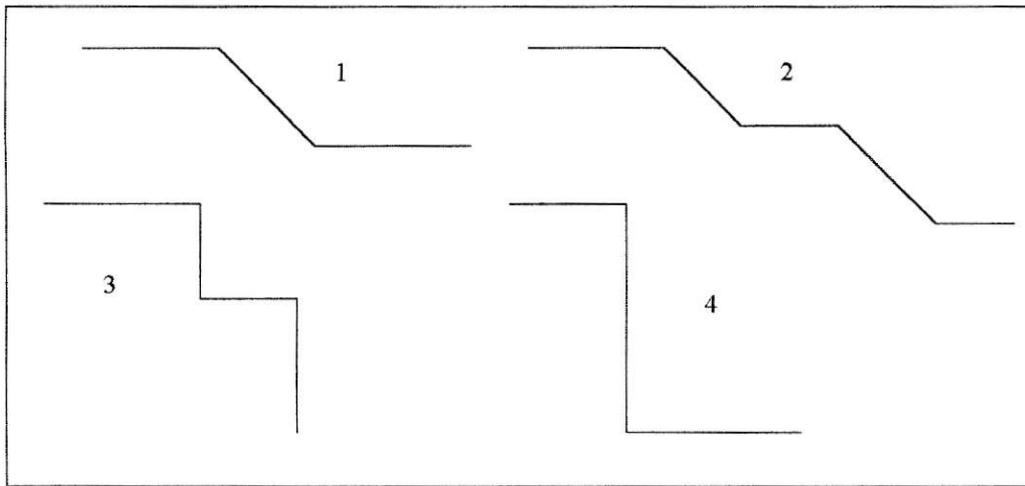
El espaciamiento de la zanja es quizás la variable más importante y más difícil de determinar, se define como el ancho del terreno sólido no alterado que se mantiene entre las zanjas adyacentes y debe ser lo más pequeño posible para mejorar al máximo el porcentaje de utilización del terreno. Sin embargo, el espaciamiento debe ser suficiente para resistir el hundimiento de la pared lateral, ya que una falla en las paredes laterales de la zanja significa un peligro en la seguridad y reduce la cantidad de espacio disponible para el lodo. Entre los factores que deben considerarse para determinar el espaciamiento entre las zanjas están:

- El peso de la maquinaria de excavación.
- La capacidad de soporte del suelo, es decir, que sea cohesivo, denso y compacto.
- El nivel de saturación del suelo, que puede depender en alto grado del contenido de humedad del lodo depositado.
- La profundidad de la zanja.
- El procedimiento de la ubicación de la cubierta y de la acumulación de tierra.

Una prueba que se usa en primera instancia para determinar la adecuación del suelo en la construcción de caminos proporciona una idea general para identificar las configuraciones o estratos de la zanja, el espaciamiento y la profundidad. Dicha prueba determina la estabilidad del suelo mediante un estabilizómetro que mide la presión horizontal transmitida por una carga vertical.

Una regla general y práctica que se debe seguir al determinar el espaciamiento de una zanja es que, por cada 0,3 metros de profundidad debe existir 0,3 a 0,5 metros de espacio entre las zanjas. Si los espacios grandes entre las zanjas no son prácticos el problema de la inestabilidad de la pared lateral puede mitigarse usando una de las cuatro variaciones de paredes que se muestran en la figura 6.

Figura 6: Ejemplos de taludes posibles de realizar en una zanja.



Fuente: Alejandro Molina C. 1994.

2.2.3 MÉTODOS DE RELLENO

Los métodos de relleno que son posibles de utilizar con lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas se mencionan a continuación, pero la descripción de cada uno de ellos se encuentra en el anexo 3, exceptuando la descripción del método que se considere más adecuado como alternativa para disponer los lodos, junto a las razones de elección, debido a la importancia que poseen.

Es indispensable mencionar que los métodos varían de acuerdo a las características del lodo y del lugar de relleno. Por lo tanto, la elección del método se debe realizar en función de ellas.

- **Zanjas**

Submétodos:

- Zanja angosta
- Zanja ancha

- **Relleno de área**

Submétodos:

- Montículo de relleno de área
- Capa de relleno de área
- Contención mediante diques

- **Eliminación conjunta**

Submétodos:

- Mezcla basura/lodo
- Mezcla suelo/lodo

Analizando las alternativas de relleno existentes para disponer los lodos de las plantas de tratamiento de aguas servidas, se considera que el relleno de zanjas es el más adecuado de adoptar dentro del grupo; el método y sus ventajas se describen a continuación:

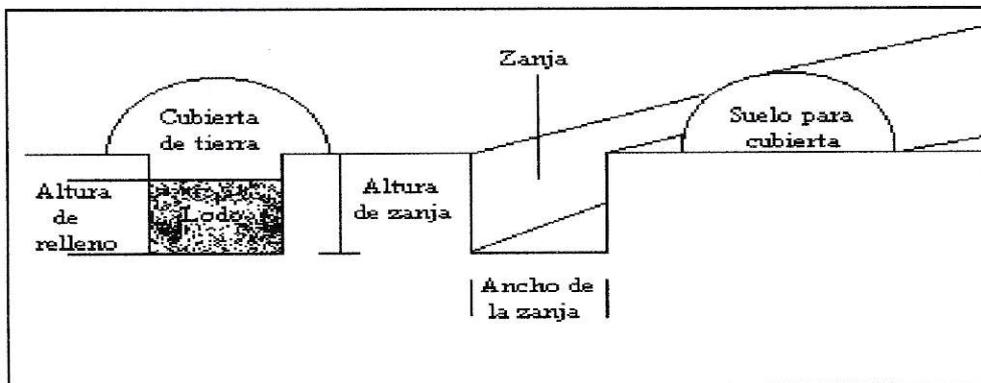
Método de Zanjas

Para esta clase de zanjas se necesita que se excave la superficie, de modo que el lodo pueda ubicarse por completo bajo el suelo original. Las excavaciones pueden realizarse si el agua subterránea y el lecho de roca se encuentran a suficiente profundidad como para mantener los suelos con la amortiguación necesaria entre éstos y los depósitos de lodo. Una vez excavada la zanja el lodo se descarga directamente sobre ella, sin necesidad de hincharlo con tierra; por lo tanto ésta sólo se utilizará para la cubierta. Aunque en algunos casos la aplicación de la cubierta puede ser menos frecuente, es común que se realice el mismo día en que se reciba el lodo, optimizando el control del olor (debido a esto las zanjas pueden ser más apropiadas para lodos sin estabilización o con poca estabilización). Cuando se realizan las excavaciones durante la construcción de la zanja se obtienen cantidades de tierra que son suficientes para las aplicaciones de cubierta, por lo que no es usual que se traiga tierra de otras partes para esta labor.

Se han identificado dos submétodos para las aplicaciones de este sistema de relleno, zanjás angostas y zanjás anchas. La primera mide menos de tres metros de ancho, mientras que la segunda mide más de tres metros. La profundidad y longitud de ambas son variables y dependen de una cantidad de factores; la profundidad, se relaciona con la profundidad del agua subterránea y el lecho de roca, la estabilidad de las paredes laterales y las limitaciones del equipo; en cambio, la longitud prácticamente no tiene límites, aunque es inevitable que dependa de las dimensiones del área y de otras condiciones del sitio, además puede verse limitada por la necesidad de interrumpir la zanja para poner un dique dentro de ella que contenga el lodo bajo en sólidos y evitar que fluya por ésta.

De los 2 submétodos mencionados anteriormente el más conveniente de acuerdo a las características del lodo es el de zanja angosta (figura 7), ya que la principal ventaja de una zanja angosta es su capacidad para manejar lodos relativamente bajos en contenido de sólidos.

Figura 7: Sección transversal de una zanja angosta típica.



Fuente: Alejandro Molina C. 1994.

La información relevante sobre los criterios de diseño de una zanja angosta, las condiciones del sitio y del lodo puede ser consultada en la tabla 5.

Tabla 5: Condiciones relevantes para el lodo y el sitio según el submétodo de zanja angosta.

Condiciones para el lodo y el sitio de relleno	
Contenido de sólidos del lodo	15 – 28% para 0,6 – 3,0 m de ancho.
Características del lodo	No estabilizado o estabilizado
Hidrogeología	Agua subterránea profunda y lecho de roca profundo.
Declives del suelo	< al 20%
Criterios de diseño:	
Ancho de zanja	0 – 3 metros
Necesidad de hinchazón	No
Necesidad de cubierta de tierra	Sí
Grosor de la cubierta	0,9 – 1,20 metros
Necesidad de traer tierra de otros lados	No
Proporción de aplicación del lodo	2.300 – 10.600 m ³ /há.
Equipos	Retroexcavadora con cargadora, excavadora y zanjadora.

Fuente: Alejandro Molina C. 1994.

Por lo general, la tierra aplicada como cubierta sobre lodos como éstos se hunde hasta el fondo, pero debido a que la zanja es angosta la cubierta hace un puente sobre el lodo, recibiendo el apoyo del terreno sólido de ambos lados.

El relleno de zanjas presenta ventajas comparativas ante otros métodos porque:

- Es estéticamente aceptable, pues no se observarán grandes montículos ni deformaciones del área escogida.
- No se necesita traer tierra para hinchar el lodo, lo que sería absolutamente necesario si se quisiera practicar el relleno de área (debido al bajo contenido de sólidos del lodo que se quiere disponer), con lo que se minimizan costos.
- Por ser el lodo floculado con un poli electrolito hace más fácil la operación en la zanja que en el relleno de área, esto porque el poli electrolito produce la inestabilidad del material, por lo que necesitaría un mayor contenido de sólidos para que pueda usarse en el relleno de la misma forma que un lodo sin polímeros.
- La maquinaria necesaria para trabajar en el relleno de zanja es menor que la necesaria para el relleno de área, lo que implica un costo menor.

- Se dispone mayor cantidad de lodo con el método de zanja que con el de eliminación conjunta, ya que en este último la parte mayoritaria la constituye la basura.
- En el relleno de zanja no existe un costo asociado por cada disposición como en la disposición conjunta. Además se deben tener en cuenta los costos de transporte, que en este último caso podrían ser altos al depender de un externo que puede encontrarse situado en un lugar lejano.
- No existe dependencia externa.

Sin embargo trae asociadas algunas desventajas:

- Mayor utilización de terreno que el relleno de área.
- No se puede utilizar la zanja cuando el agua subterránea se encuentra demasiado cerca de la superficie.
- Puede acumularse una gran cantidad de tierra excedente, ya que por cada volumen que se saque se debe considerar además un 30% adicional debido a la expansión del material, lo que puede tener un costo poco despreciable si se quiere sacar del lugar.

En vista que la elaboración del proyecto para un mono - depósito demanda información específica tal como producción diaria, humedad del material a depositar, etc. se ha estimado considerar el diseño, instalación y funcionamiento del relleno como los resultados del estudio, por lo que se describirán en la sección del mismo nombre.

MATERIALES Y MÉTODO

Para cumplir con el objetivo definido, el cual consiste básicamente en proponer una alternativa para la utilización y/o disposición final de los lodos generados por las plantas de tratamiento de aguas servidas de Población y Santa Cruz, se desarrollarán una serie de actividades para las cuales se emplearán los materiales y métodos descritos a continuación:

- **Estimación de la producción de lodos**

Para estimar la producción de lodos de las plantas de tratamiento de aguas servidas de Población y Santa Cruz se empleará un método de evaluación rápida, el cual consiste en multiplicar los Kg de DBO por un factor de generación de lodos igual a 0,7 Kg de lodo/Kg de DBO removida, que se encuentra dentro de los rangos típicos descritos por la literatura (0,4 - 0,9).

- **Caracterización de los lodos**

A medida que se genera lodo en las plantas de tratamiento de aguas servidas se vuelve indispensable tener un conocimiento constante sobre las características de éste. Para ello, es necesario realizar análisis físico – químicos y microbiológicos que den cuenta de la composición del lodo, la que debe servir como guía para poder decidir su destino. De igual forma, tener estos resultados proporciona una información importante con respecto al funcionamiento de la planta y a las costumbres del pueblo que alimenta la planta de tratamiento con sus aguas servidas. Por lo tanto, cualquier cambio drástico puede ser detectado con un buen seguimiento de las características del lodo que se está produciendo.

Debido a que el laboratorio existente en la empresa (ESSEL S.A) no cuenta con la implementación necesaria para realizar análisis con lodos, éstos (incluyendo la toma de muestra) serán realizados a través de laboratorios externos (KNOW S.A y DICTUC S.A,

ambos reconocidos por la Super Intendencia de Servicios Sanitarios, SISS). La caracterización incluirá análisis de peligrosidad, análisis físico - químicos, análisis microbiológicos y ensayos ecotoxicológicos; todos basados en el anteproyecto de reglamento para el manejo de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de aguas (CONAMA. 2000), en cuanto a los análisis y su correspondiente metodología. Sin embargo, para evaluar la peligrosidad del lodo se debió recurrir a las Normas Chilenas, ya que en el Anteproyecto no se hace mención sobre la metodología a usar. Los resultados obtenidos son comparados (cuando corresponde) tanto con los límites establecidos en el Anteproyecto ya mencionado como con la Normativa Internacional, la cual incluye la Normativa Norteamericana (EPA), Europea (UE), Alemana, Española, Suiza y Francesa, que se encuentran en el anexo 1.

- Toma de muestra

El lugar en que se toma la muestra es importante para obtener una caracterización representativa, reproducible y comparable entre muestras diferentes.

Cuando se quiere caracterizar un lodo se debe asegurar que se encuentre en las mismas condiciones en que se va a evacuar, ya que tomar la muestra en otras condiciones no representa el lodo que se tendrá al momento de evacuarlo para su disposición o utilización.

Para proceder a un muestreo de lodo se debe tener presente la necesidad de tomar una muestra que sea representativa de éste y evitar su contaminación con sustancias ajenas, lo que se logra teniendo en mente un cuidadoso manejo de la muestra y utilizando envases de materiales que no contaminen ni reaccionen con el lodo, como por ejemplo teflón, cristal, o acero inoxidable. Además de rotularlas, y aislarlas para que mantengan una temperatura alrededor de los 4°C durante todo el tiempo de transporte. Por lo que se deben practicar los análisis lo antes posible para evitar preservar las muestras, ya que si bien la adición de preservantes ayuda bastante también puede interferir con la determinación de algunos componentes.

La calidad del muestreo es mejor cuando se extraen varias muestras pequeñas durante un período de tiempo, en lugar de una muestra puntual de mayor tamaño. El muestreo de los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de Población y Santa Cruz se realizó en forma compuesta, es decir, se tomaron cantidades de lodos de distintos sectores, las que

posteriormente se juntaron y mezclaron, quedando como producto una sola muestra de lodo de cada planta de tratamiento. La muestra compuesta fue enviada rápidamente al laboratorio encargado de los análisis para la caracterización del lodo.

- **Compostaje**

La técnica seleccionada, por las razones expuestas en el punto 2.1.3, es compostaje en pilas de volteo. La viabilidad de esta alternativa será verificada a través de una experiencia piloto a pequeña escala realizada en una sección del terreno de la planta de tratamiento de aguas servidas de Santa Cruz. Una vez comprobada la viabilidad de esta técnica con lodos se proseguirá a efectuar su evaluación económica.

- Experiencia piloto

Materiales:

- Agua
- Fardo de paja (1)
- Lodo de la planta de tratamiento de aguas servidas de Santa Cruz
- Malla
- Sacos de virutas de madera (3)
- Tambores (2)
- Termómetro

Descripción del método "compostaje" en pilas de volteo:

En esta experiencia, iniciada el 16 de enero y finalizada el 5 de marzo del 2001, el compostaje en pilas de volteo se lleva a cabo construyendo hileras a partir de una mezcla de lodos y material soporte, este último compuesto por virutas de madera y paja, que poseen la misma relación carbono/nitrógeno (40/1). La utilización de este material de enmienda permitirá proporcionar aireación a la mezcla y una mayor cantidad de carbono para que se

lleve a cabo el proceso, pues los lodos por sí solos poseen un muy bajo contenido de este elemento. La relación para mezclar el lodo y el material soporte se muestra en la tabla 6.

Tabla 6: Relación lodo/material soporte en pilas experimentales de compostaje.

Pila	Relación lodo/material soporte (V/V)
1	1:1
2	2:1
3	1:2,5

Dicha relación no se realizó basándose en la masa, sino que en los volúmenes, para lo cual se utilizaron 2 tambores de iguales dimensiones, uno para el lodo y el otro para el material soporte.

Las pilas pueden adoptar variadas formas, pero el método de construcción debe permitir desarrollar el proceso en las mejores condiciones de humedad, temperatura y aireación (porosidad), para que el proceso se lleve a cabo en forma óptima.

Para desarrollar el proyecto se contempló la construcción de 3 pilas de forma triangular, con longitudes de 2 m de largo, 70 cm de alto y 1,5 m de ancho, separadas entre sí por una distancia de 2 m y puestas al aire libre sin sombra, pero cubiertas con una malla para mantener la humedad, puesto que las altas temperaturas que se alcanzan en verano producen rápidamente la sequedad del material a compostar. Una vez que se tienen formadas las pilas se debe controlar la temperatura y la humedad hasta que termine el proceso.

La temperatura debe ser medida dos veces al día, una en la mañana y otra en la tarde, siempre a la misma hora, en esta oportunidad aproximadamente a las 12 y 18 horas.

La humedad es mantenida mediante el riego de la pila, el cual se realiza cada 3 o 4 días dependiendo del grado de sequedad que presente. Al mismo tiempo se efectúa el volteado de la pila para dar las condiciones aeróbicas al proceso y alcanzar una humedad homogénea en toda la pila (se debe dejar claro que el volteado también se puede realizar para liberar el exceso de humedad).

El final del proceso de compostaje será indicado por los descensos de temperatura de la pila, y será confirmado mediante un criterio simple, que consiste en colocar un poco de

material compostado dentro de una bolsa plástica que se mantendrá cerrada por 24 horas, después de las cuales no deberá existir emanaciones de malos olores, humedad ni aumentos de temperatura.

- **Mono - relleno**

Por las razones expuestas en el punto 2.2.3, el método seleccionado para disponer los lodos generados por las plantas de tratamiento será el método de Zanjas, descrito anteriormente como parte del marco teórico. La evaluación económica se realizará de acuerdo a los resultados de la aplicación del método.

- **Evaluación económica**

Se procederá a evaluar los costos asociados a la construcción y operación de las alternativas seleccionadas. Para efectos de la evaluación se dividirán los costos en costos de inversión y en costos de operación, para ambos casos. Finalmente, se construirá un flujo de costos y se empleará como criterio de evaluación económica el Valor Actual de Costos (VAC). El Valor Actual de Costos se obtiene por:

$$VAC = - I_0 + \sum [F / ((1+t)^n)]$$

Donde:

I_0 : Representa la inversión

F : Flujos obtenidos en cada año

t : Tasa de interés, considerada como el 20%

n : Año

RESULTADOS

Para poder obtener resultados concretos sobre las posibilidades de disposición del lodo generado por las plantas de tratamiento de Población y Santa Cruz, según las alternativas estudiadas, es necesario contar por lo menos con la cantidad aproximada de lodo producido diariamente y la composición que presenta al momento de terminar el tratamiento, de acuerdo a los resultados obtenidos se basará el diseño del proyecto para cada una de las alternativas descritas y consecuentemente la evaluación económica de éstos, los resultados son expuestos en los siguientes puntos:

1 TRATAMIENTO DEL AGUA Y LODO RESIDUAL

1.1 PRODUCCIÓN DE LODOS

La producción de lodos de las plantas de tratamiento de aguas servidas se ha estimado a partir del caudal de aguas servidas y la carga orgánica que llega a cada una de ellas. Los valores estimados para las plantas de tratamiento de Población y Santa Cruz se pueden observar en las tablas 7 y 8, respectivamente. Con estos resultados es factible hacer una evaluación económica para las alternativas de disposición, pero se debe tener presente que también es posible obtener la producción real de lodos generados en las plantas de tratamiento. Dicha producción fue determinada para cada una de las plantas y en ambos casos hubo coincidencia con los valores estimados, lo que demuestra la veracidad de éstos.

Tabla 7: Estimación de la producción de lodos en la planta de tratamiento de aguas servidas de Población.

Año	Caudal medio total (l/seg)	Kg DBO/día	Kg lodo/día (base seca) *	m ³ lodo/día (al 1%)	Kg lodo/día (al 2,8%)	m ³ lodo/día (al 2,8%)	Ton lodo/año	m ³ de lodo/año
2000	2,08	47,30	33,11	3,31	1.183	1,18	432	432
2001	2,15	49,20	34,44	3,44	1.230	1,23	449	449
2002	2,22	51,00	35,70	3,57	1.275	1,28	465	465
2003	2,29	52,90	37,03	3,70	1.322	1,32	483	483
2004	2,37	54,80	38,36	3,84	1.370	1,37	500	500
2005	2,44	56,80	39,76	3,98	1.420	1,42	518	518
2006	2,52	58,80	41,16	4,12	1.470	1,47	537	537
2007	2,59	60,70	42,49	4,25	1.518	1,52	554	554
2008	2,66	62,80	43,96	4,40	1.570	1,57	573	573
2009	2,74	64,80	45,36	4,54	1.620	1,62	591	591
2010	2,82	67,00	46,90	4,69	1.675	1,68	611	611

* Utilizando factor 0,7 Kg de lodo/Kg DBO removida.

** Para efectuar los cálculos se ha considerado densidad 1.

Tabla 8: Estimación de la producción de lodos en la planta de tratamiento de aguas servidas de Santa Cruz.

Año	Caudal medio total (l/seg)	Kg DBO/día	Kg lodo/día (base seca) *	m ³ lodo/día (al 0,8%)	Kg lodo/día (al 18%)	m ³ lodo/día (al 18%)	Ton lodo/año	m ³ de lodo/año
2000	62,1	1.028	720	90	3.998	4,0	1.459	1.459
2001	64,3	1.072	751	94	4.172	4,2	1.522	1.522
2002	66,4	1.117	782	98	4.345	4,3	1.585	1.585
2003	68,5	1.162	813	102	4.519	4,5	1.649	1.649
2004	69,7	1.183	828	104	4.599	4,6	1.678	1.678
2005	70,7	1.203	842	105	4.679	4,7	1.707	1.707
2006	72,2	1.224	857	107	4.759	4,8	1.737	1.737
2007	73,4	1.244	871	109	4.839	4,8	1.766	1.766
2008	74,6	1.265	886	111	4.919	4,9	1.795	1.795
2009	75,9	1.285	900	113	4.999	5,0	1.824	1.824
2010	77,3	1.306	914	114	5.078	5,1	1.853	1.853

* Utilizando factor 0,7 Kg de lodo/Kg DBO removida.

** Para efectuar los cálculos se ha considerado densidad 1.

1.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS

1.2.1 ANÁLISIS DE PELIGROSIDAD

Cuando un residuo presenta alguna característica de toxicidad por lixiviación, inflamabilidad, corrosividad o reactividad es considerado como peligroso. Para poder determinar si los lodos generados en las plantas de tratamiento de Población y Santa Cruz poseían estas características se hicieron los análisis correspondientes, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 9: Resultados de los análisis de peligrosidad realizados a lodos provenientes de las plantas de tratamiento de Población y Santa Cruz.

Análisis	Lodo de Población	Lodo de Santa Cruz
Toxicidad por lixiviación	*	*
Corrosividad	0	0
Inflamabilidad	0	0
Reactividad	1	1

* Se realizó el ensayo de toxicidad de la muestra de acuerdo a la NCh 2313/5 anexo B, obteniendo como resultado que la muestra no presenta toxicidad.

Los resultados se encuentran expresados basándose en una escala de valores, en la cual los significados son:

0 : Ningún peligro conocido

1 : Ligero

2 : Moderado

3 : Severo

4 : Extremo

Los resultados obtenidos demuestran que los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas servidas pueden ser considerados no peligrosos, esto es a pesar de haber tenido una reactividad calificada como ligera. Dicha afirmación se basa en el Reglamento Sobre Manejo Sanitario de Residuos Peligrosos (elaborado por el SESMA), el cual contiene una clasificación detallada de los residuos, en residuos peligrosos o no peligrosos, dentro de la

cual (después de largos estudios) se han incluido todos los residuos según sus características. Dentro de los residuos considerados se encuentran los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas servidas, clasificados como no peligrosos.

1.2.2 ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICOS

La gran variabilidad en la composición de los lodos provenientes de aguas servidas ha obligado a realizar constantemente análisis que den cuenta de la composición del lodo proveniente de la planta de tratamiento de interés, ya que aún, por las razones expuestas, no se ha podido establecer un "perfil analítico modelo de lodo residual".

En la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos de los primeros análisis físico – químicos realizados a las muestras de lodos de las plantas de tratamiento de aguas servidas de Población y Santa Cruz.

Tabla 10: Resultados de análisis físico – químicos realizados a las muestras de lodo.

Análisis	Lodo Santa Cruz	Lodo Población	Unidad
Carbono Orgánico Total	11,39	1,96	%
Conductividad eléctrica	3.620	4.020	uS/cm
Densidad	1,03	1,01	g/ml
pH	5,81	6,12	-
Humedad	82,84	97,24	mg/kg, lodo b.s.
Fósforo Total	942	2.034	mg/kg, lodo b.s.
Fósforo disponible	405	655	mg/kg, lodo b.s.
Nitrógeno Total	13.785	14.479	mg/kg, lodo b.s.
Nitrógeno disponible	530	931	mg/kg, lodo b.s.
Potasio disponible	4.525	9.941	mg/kg, lodo b.s.
Sólidos Totales	17,14	2,59	%
Sólidos volátiles	65,59	79,46	%
* Metales			
Molibdeno	0,40	0,29	mg/Kg. lodo b.s
Cadmio	< 0,125	< 0,125	mg/Kg. lodo b.s
Plomo	1,07	0,42	mg/Kg. lodo b.s
Zinc	71,0	70,3	mg/Kg. lodo b.s
Cobre	187	153	mg/Kg. lodo b.s
Níquel	0,25	0,18	mg/Kg. lodo b.s
Cromo	0,29	0,27	mg/Kg. lodo b.s
Arsénico	2,33	2,32	mg/Kg. lodo b.s
Selenio	< 0,125	<0,125	mg/Kg. lodo b.s
Mercurio	< 0,025	<0,025	mg/Kg. lodo b.s

* La determinación de metales en conjunto con la de *Coliformes fecales*, fueron los únicos análisis realizados por el laboratorio DICTUC S.A.

- Carbono Orgánico Total

Como se puede observar, el lodo proveniente de la planta de tratamiento de aguas servidas de Santa Cruz posee un alto contenido de materia orgánica en comparación con el lodo proveniente de la planta de tratamiento de Población, esta diferencia se puede deber a que en la primera se utiliza un polielectrolito para flocular el lodo y hacer más fácil su deshidratado en el filtro de banda mediante el aumento del contenido de sólidos; en cambio, el lodo de la planta de tratamiento de Población pasa directamente del digestor al filtro, sin adición de floculantes. Sin embargo, aún considerando la adición del floculante, el lodo de Santa Cruz se encuentra con un bajo porcentaje de materia orgánica en comparación con la composición media de lodos domiciliarios que se producen en otros países (80-90%), basados igualmente en lodos activados (Hernández A. 1996).

- pH

El pH es un indicador del grado de estabilización del lodo. Un lodo digerido presenta un pH > 7,2. En ningún caso los lodos superan este valor; sin embargo, el lodo de Población posee un pH mayor que el lodo de Santa Cruz, esto se puede explicar por diferencias en las unidades de tratamiento, ya que en Santa Cruz sólo existe un estanque de aireación, en cambio en Población además del estanque de aireación existe un digestor, lo que da un mayor tiempo de residencia para los lodos, alcanzando una mayor estabilidad.

- Humedad

La humedad representa el contenido de agua que posee el lodo. Claramente el lodo de la planta de tratamiento de Población presenta un deshidratado deficiente, que no permite un manejo adecuado del lodo, y que al momento de transportarlo eleva los costos que al mismo tiempo se traducen en pérdidas, ya que prácticamente solo se transporta agua.

- Nitrógeno, Fósforo y Potasio

A pesar de la cercanía que existe entre Población y Santa Cruz los mayores contenidos de N, P y K se presentan en Población. La explicación para tal hecho está relacionada con las actividades de cada pueblo. Población es una localidad dedicada netamente a la agricultura, en cambio Santa Cruz con una mayor población es una zona más urbanizada, por lo que no depende solo de la agricultura. Por lo tanto, es posible que muchos de los residuos de fertilizantes (basados en potasio, superfosfatos, amonios, nitratos) e insecticidas, herbicidas, etc. (ricos en nitrógeno y fósforo como por ejemplo el DNOC y el Diclorvos, respectivamente) utilizados en Población puedan ir a dar al alcantarillado por razones de costumbres, llegando finalmente a la planta de tratamiento de aguas servidas. Los valores obtenidos en el lodo de Población son bastante altos con respecto a los de Santa Cruz, sobre todo si se considera que la población en esta última es aproximadamente 10 veces más grande que la de Población.

- Sólidos totales y volátiles

Los sólidos totales constituyen el material que queda después de la evaporación del agua a una determinada temperatura.

El porcentaje de sólidos volátiles (que corresponde a la pérdida de peso durante la ignición que experimentan los sólidos totales, suspendidos o disueltos) constituye otro indicador del proceso de digestión y estabilización del lodo. Según estudios realizados un lodo con un contenido de sólidos volátiles menores al 50% se encuentra estabilizado (ya que el contenido de sólidos volátiles permite obtener una estimación del contenido de materia orgánica de la muestra). Por lo tanto si se considera esta referencia en conjunto con la de pH se puede decir que ninguno de los lodos se encuentra completamente estabilizado.

- Conductividad eléctrica

A pesar de que no existe un valor de referencia para establecer una conductividad eléctrica baja o alta, se debe tener en cuenta que los suelos generalmente aumentan la

conductividad eléctrica al aplicarles el lodo, debido a aniones como SO_4^- , Cl^- , NO_3^- y cationes como Na^+ , K^+ , Ca^{+2} (Costa F y col., 1987).

El riesgo por el aumento de la salinidad se debe a que en algunos suelos el exceso de sales no es lixiviado en el horizonte agrícola, lo que trae asociado peligros como:

- Disminución de la capacidad de germinación de la semilla y del crecimiento de la planta.
 - Competencia del Sodio (Na^+) con Calcio y Magnesio, Ca^{+2} y Mg^{+2} , respectivamente.
 - Empeoramiento de la estructura del suelo.
 - Obstrucción de poros en suelos de granulometría fina, favoreciendo los fenómenos de encostramiento.
-
- Metales pesados

En cuanto al contenido de metales pesados se puede decir que éstos se encuentran por debajo de los límites establecidos para la utilización de lodos en agricultura, tanto en la normativa internacional (Europea, EPA, etc.) como en el Anteproyecto de Reglamento Para el Manejo de Lodos No Peligrosos Generados en Plantas de Tratamiento de Aguas. Por lo tanto, los lodos no presentan limitación por metales para destinarlos a uso agrícola, al contrario, las bajas concentraciones de metales en éstos facilitan su aplicación, ya que aportan las cantidades suficientes para el desarrollo de la vida vegetal y se disminuyen además los riesgos por contaminación con metales pesados en la zona de aplicación y cursos de aguas cercanos.

1.2.3 ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

La cantidad de organismos patógenos presentes en el lodo depende del proceso seguido en la planta de tratamiento de aguas servidas. Los tipos de microorganismos que existen en los lodos son muy variados, pero sólo se analizaron las *coliformes fecales*, la *salmonella*, los *huevos de helminto* y los *virus MS-2*, los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 11: Resultados de los análisis microbiológicos realizados a lodos.

Microorganismo	Lodo de Población		Lodo de Santa Cruz	
<i>Coliformes fecales</i>	2.200	NMP/g de lodo b.s	600	NMP/g de lodo b.s
<i>Salmonella sp.</i>	0	NMP/4g de lodo b.s	0	NMP/4g de lodo b.s
<i>Huevos de helminto</i>	0	Huevo/4g de lodo b.s	0	Huevo/4g de lodo b.s
<i>Virus MS - 2</i>	53.623	UFP/4g de lodo b.s	12.937	UFP/4g de lodo b.s

Las *coliformes fecales* son bacterias que se encuentran presentes en el tracto intestinal humano. Junto con estos organismos el hombre descarga otros microorganismos patógenos causantes por ejemplo de fiebre tifoidea, diarrea, cólera, entre otras. Teniendo en cuenta que la población de los patógenos es muy baja y que por lo tanto son difíciles de detectar, se utiliza la presencia de los organismos coliformes como indicador de la presencia de éstos, ya que son numerosos y fáciles de localizar (Ramalho. 1996).

La *salmonella* es una bacteria que se encuentra en el tracto intestinal de animales de ganado, cerdos, pavos, gatos, perros, pollo y muchas otras especies. Esta bacteria puede causar las fiebres entéricas (tifoidea y paratifoidea) e infección intestinal por intoxicación con alimentos contaminados o crudos, lo que revela la importancia de su detección (<http://www.solomujeres.com>).

Los *huevos de helmintos* son huevos de gusanos que pueden invadir el cuerpo humano causando diversas enfermedades, algunas tan graves que pueden afectar la totalidad del cuerpo. Entre los portadores de éstos gusanos se pueden nombrar al perro, al cerdo y al jabalí. Estos huevos se han tomado como indicadores para determinar la contaminación por parásitos (<http://www.ine.gob.mx/dgra/normas/agua/>).

Los *virus entéricos* son expulsados en las heces de humanos y de animales, y adquiridos por ingestión de alimentos y bebidas contaminadas. Estos virus son más resistentes al proceso de desinfección que las bacterias, pero las técnicas de detección no son factibles de realizar en forma rutinaria por su alto costo (http://www.idrc.ca/library/water/index_e.html).

Como se observa en la tabla 11, el contenido de *virus MS-2* supera al de *coliformes fecales* presentes en la muestra de lodo, como se mencionó anteriormente, podría deberse a la mayor resistencia que presentan los virus al proceso de tratamiento de las aguas servidas. Sin embargo, es necesario hacer notar que el contenido de *coliformes fecales* se presenta bajo en comparación con lodos de plantas de similares características descritos en literatura.

1.2.4 ENSAYOS ECOTOXICOLÓGICOS

Para evaluar el riesgo potencial que presentan los lodos en el agua y en el suelo, el Anteproyecto de Reglamento para el Manejo de Lodos No Peligrosos Generados en Plantas de Tratamiento de Aguas (CONAMA. 12 Junio 2000)¹ a propuesto realizar ensayos de toxicidad utilizando parámetros biológicos como Daphnias, lombrices y semillas, basados en la lixiviación para ensayos con microcrustáceos, ensayos con lombrices de tierra y germinación de semillas, respectivamente, de tal forma que se puedan conocer los efectos que se podrían provocar en los organismos que viven o dependen del agua y del suelo. Dichos ensayos tienen como objetivo someter a los parámetros biológicos a concentraciones de agua o lodo residual en las cuales el 50% de las plantas o animales del ensayo son inhibidos durante un determinado tiempo de exposición, los resultados se encuentran en la tabla 12.

Las Daphnias, también conocidas como pulgas de agua, son diminutos crustáceos denominados *Daphnia pulex* y *Daphnia magna* sp. Constituyen un alimento muy corriente para muchos peces en estado de libertad. A su vez, las Daphnias comen bacterias que pueden ser peligrosas para los alevines, contribuyendo de esta manera a la purificación del agua y al desarrollo de éstos.

La lombriz en cambio, tiene gran importancia en la agricultura por su régimen alimenticio micrófago y por las galerías que excava en el suelo, que contribuyen a airear la tierra.

Las semillas constituyen embriones en estado latente encerrados en un fruto y que tras la dispersión y germinación en un ambiente óptimo, da una nueva planta.

¹ La versión posterior del anteproyecto de reglamento para el manejo de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de aguas no contempla los ensayos ecotoxicológicos, el requisito se ha eliminado principalmente por los costos que trae asociados y por la falta de laboratorios comerciales especializados en el tema.

Tabla 12: Resultados de los ensayos ecotoxicológicos realizados con lodos provenientes de las plantas de tratamiento de Población y Santa Cruz.

Ensayo	Lodo de Población CI50	Lodo de Santa Cruz CI50
Lixiviación para ensayos con microcrustáceos	24 hrs para una dilución al 50% del lixiviado. 48 hrs para una dilución al 10% del lixiviado.	24 hrs para una dilución al 50% del lixiviado. 48 hrs para una dilución al 10% del lixiviado.
Ensayos con lombrices de tierra	22 hrs sin dilución (al 100%) produce una inmovilización del total de la población.	24, 48 y 72 hrs, sin dilución no produce inmovilización de la población.
Germinación de semillas	24, 48 y 72 hrs sin dilución (al 100%) se produce la germinación de la totalidad de las semillas.	24, 48 y 72 hrs sin dilución (al 100%) se produce la germinación de la totalidad de las semillas.

Los ensayos son realizados con distintas concentraciones de la muestra, y los resultados de CI50 generalmente se obtienen a las 24, 48 y 72 horas.

El ensayo con microcrustáceos es realizado con Daphnias neonatos de la segunda generación de crías, ya que son las más móviles; por lo tanto cuando se ven afectados se reconoce inmediatamente un cambio en el medio, debido a la falta de movimiento por parte de éstos.

Los resultados de la tabla 12 muestran inhibición del 50% de la población de neonatos a las 24 y 48 horas para las concentraciones expuestas. El efecto inhibitorio provocado podría atribuirse a diversas causas, entre ellas, la exposición a residuos tóxicos presentes en los lodos, especialmente insecticidas, como por ejemplo Dieldrina, DDT, Dieldorvos y hervicidas selectivos como DNOC (insecticida, acaricida con efectos secundarios fungicidas), que se utilizan en los cultivos de cereales, vid y frutas (<http://media.payson.tulane.edu/html>). Generalmente éstos poseen excelente solubilidad en agua, por lo que fácilmente pueden llegar a las plantas de tratamiento de aguas servidas, ya sea por infiltración o por las costumbres de enjuagar los envases del producto y eliminar los residuos de éstos, enviándolos directamente al alcantarillado.

Para el ensayo con lombrices de tierra se utiliza la muestra sin dilución, por lo que la muerte de las lombrices expuestas al lodo de la planta de tratamiento de Población se atribuye principalmente al estado acuoso de la muestra, ya que por naturaleza no es el medio en que se

desenvuelven las lombrices. En cambio, el lodo de Santa Cruz presentó un medio tolerante para las lombrices llegando a 72 horas sin producir alteraciones en su actividad.

Las semillas son las únicas que no presentaron problemas, ya que las germinaciones tuvieron éxito tanto en el lodo de Población como en el de Santa Cruz, lo que muestra la falta de efectos negativos por parte de los lodos sobre éstas. En este caso el lodo acuoso de Población no presentó problemas para germinar la semilla, pero probablemente un tiempo mayor puede llevar a la putrefacción de ésta por exceso de agua, lo que para efectos de utilización del lodo en la agricultura no tiene importancia, ya que siempre el lodo debe ser incorporado al suelo en forma homogénea.

2 ALTERNATIVAS DE DISPOSICIÓN DE LOS LODOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de las 2 alternativas de disposición descritas anteriormente, compostaje y mono - relleno. Además de la evaluación económica de éstas de acuerdo a las respectivas técnicas o métodos seleccionados.

2.1 COMPOSTAJE

Basándose en la técnica de compostaje seleccionada se ha desarrollado una experiencia piloto de compostaje para posteriormente dimensionar una planta de compostaje que funciona bajo la misma técnica, los resultados obtenidos se presentan a continuación:

2.1.1 EXPERIENCIA PILOTO DE "COMPOSTAJE"

La medición de la temperatura diaria de las pilas de la experiencia se realizó con un termómetro digital, los resultados que se obtuvieron en las tres pilas experimentales durante el proceso de compostaje se encuentran en la tabla 13.

Con estos resultados es posible hacer un gráfico que muestre el comportamiento de la temperatura en el tiempo (representado por las mediciones) para las tres pilas de compostaje, considerando un período de tiempo que comienza en enero y termina a comienzos de marzo (las temperaturas que se obtuvieron a partir de la segunda quincena de febrero no se incluyen en la tabla 13 porque prácticamente se mantienen constantes). Dicho gráfico se encuentra en la figura 8.

Tabla 13: Temperaturas (°C) alcanzadas en las pilas de compostaje "experiencia piloto".

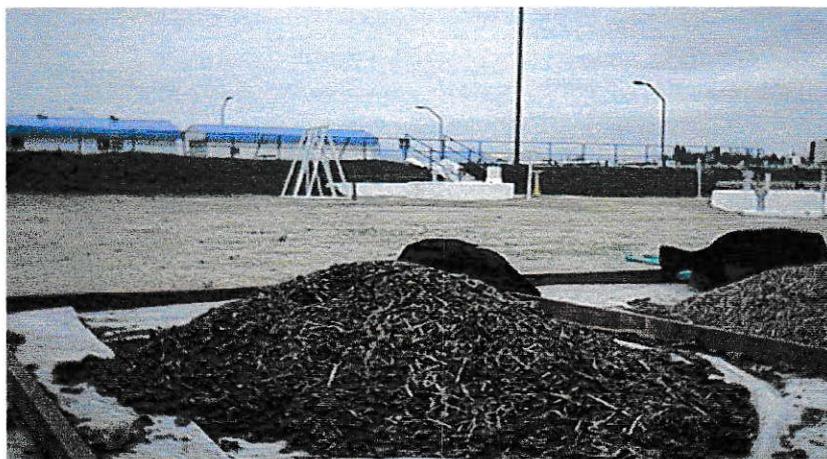
Medición	T° Pila 1	T° Pila 2	T° Pila 3	Medición	T° Pila 1	T° Pila 2	T° Pila 3
1	27,5	25,2	31,2	34	35,5	37,6	33,1
2	45,6	34,3	54,6	35	34,9	36,0	31,2
3	47,9	38,1	58,4	36	35,1	33,1	30,2
4	58,9	42,0	53,4	37	34,7	32,6	29,8
5	59,6	44,5	48,0	38	35,2	32,6	29,7
6	58,9	49,7	38,1	39	33,2	32,2	28,9
7	61,4	55,9	33,2	40	36,9	36,2	33,5
8	44,9	51,2	38,7	41	36,2	32,3	24,7
9	43,4	51,6	34,7	42	39,9	32,7	30,8
10	56,8	64,1	45,1	43	27,4	30,4	24,1
11	58,1	64,6	48,2	44	28,7	27,9	28,6
12	54,7	58,2	48,1	45	36,3	31,1	29,6
13	47,1	59,3	49,1	46	33,4	29,7	31,8
14	50,4	56,1	45,0	47	34,3	27,5	31,2
15	44,5	53,1	43,9	48	34,3	31,0	32,0
16	43,9	53,9	39,9	49	35,6	29,4	32,7
17	40,5	47,1	36,7	50	36,5	30,5	32,8
18	39,1	45,9	36,3	51	32,5	30,6	31,4
19	38,9	47,6	37,1	52	31,9	29,3	30,8
20	36,7	39,9	35,9	53	33,7	29,5	30,1
21	32,5	38,6	34,2	54	36,4	28,2	32,5
22	39,3	45,7	33,4	55	31,4	28,3	32,7
23	36,1	42,1	33,1	56	32,5	31,6	38,1
24	35,6	37,6	33,2	57	30,6	30,2	31,3
25	34,3	35,7	31,2	58	29,2	27,5	29,1
26	35,5	37,6	33,1	59	27,4	27,0	27,2
27	34,9	36,0	31,2	60	23,7	27,1	28,7
28	35,1	33,1	30,2	61	27,6	26,7	29,6
29	34,7	32,6	29,8	62	29,4	28,9	29,5
30	35,2	32,6	29,7	63	29,5	28,6	29,7
31	33,2	32,2	28,9	64	29,9	28,6	29,6
32	36,9	36,2	33,5	65	29,6	27,3	30,9
33	36,2	32,3	24,7	66	29,7	31	29,4

Las precauciones que se tomaron para llevar a cabo el proceso consistieron básicamente en lograr una buena relación C/N~30/1, aireación y humedad. La importancia de la humedad puede verse reflejada en el comportamiento de la temperatura, ya que se observa en varias mediciones (sobre todo de la pila 3) un decaimiento de ésta, atribuido principalmente a la falta de humedad en la pila, que en el caso de la pila 3 es más notorio debido a la sequedad de la paja y a la poca cantidad de lodo que contiene (ya que éste es el único que aporta agua a

la pila, esto es sin considerar el riego permanente de ellas), ver en el gráfico el tercer día (cuarta y quinta medición, pila 3).

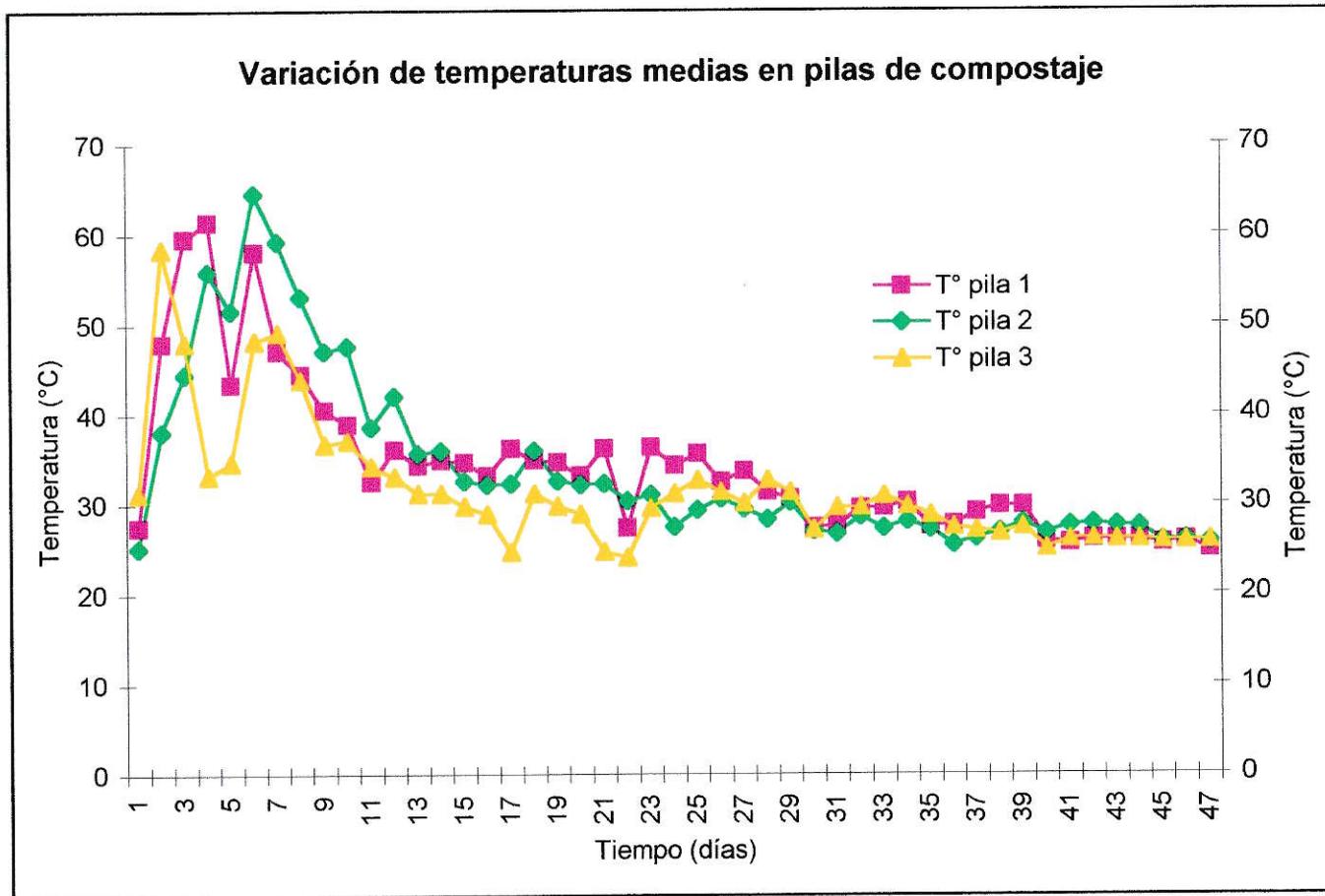
En vista de que el volteo y el riego se hacían en el mismo día, se produce en todas las pilas un decaimiento brusco de la temperatura debido principalmente a la adición de agua y a la aireación de la pila mediante el volteo (aproximadamente cada 3 o 4 días), alcanzando a continuación altas temperaturas en forma acelerada, ya que nuevamente se encuentra el medio en condiciones óptimas para los microorganismos. Luego del primer riego y volteo se produce el máximo peak en la pila 2 (cuya imagen se encuentra en la fotografía 3), lo que deja claro que a pesar de haber comenzado lentamente a incrementar su temperatura es la mejor mezcla, es decir, en esa proporción se ha logrado la mejor relación C/N. En cambio, las pilas 1 y 3 comenzaron rápidamente a elevar su temperatura, pero antes de su volteo y riego ya habían alcanzado su máximo (debido a que luego de voltear y regar no siguieron aumentando su temperatura), que por cierto fue menor en ambos casos a la de la pila 2.

Fotografía 3: Pila experimental de compostaje N° 2.



Dentro de las 2 primeras semanas de haber comenzado el proceso se percibía notoriamente olor a amoníaco (NH_3 (g)) en las pilas, lo que indica que las bacterias quimioorganotróficas están trabajando en la mineralización del nitrógeno orgánico, proceso en el cual se produce la liberación del amoníaco. Con ello, se muestra el trabajo de los microorganismos para transformar los residuos de composición compleja a otra relativamente simple.

Figura 8: Gráfico variación de temperaturas (°C) medias en pilas de compostaje "experiencia piloto".



Como se puede ver en la figura 8 el comportamiento más irregular lo presentó la pila 3, esto pudo ser provocado por la falta de agua, ya que es fundamental una humedad adecuada para que se realice el proceso en forma efectiva. Por lo tanto, para desarrollar el compostaje es de vital importancia tener un cuidadoso control de las variables que forman parte del desarrollo de éste (temperatura, humedad, etc.).

A medida que se desarrolla el proceso las temperaturas van bajando hasta mantenerse constantes (alrededor de los 25 °C), es entonces cuando termina la actividad microbiológica y en conjunto con ésta el proceso de compostaje. De tal manera que la duración de éste es aproximadamente 1½ mes; esto es, sin considerar el reposo posterior del material (curado) el cual toma un período aproximado de 1 mes, después del cual el producto se encuentra listo para su almacenamiento (previo cribado) y distribución.

El comportamiento de la temperatura coincide con la descrita teóricamente, por lo que se puede esperar un proceso de compostaje óptimo al utilizar como material el lodo proveniente de las plantas de tratamiento de aguas servidas, siempre y cuando se tenga un manejo adecuado del proceso, considerando la relación C/N, la aireación y la humedad, como se dijo anteriormente.

Para comprobar la efectividad del proceso respecto del abatimiento de microorganismos patógenos, una vez concluido el proceso de compostaje, se encargó al laboratorio DICTUC S.A. realizar la toma de muestra compuesta y el respectivo análisis bacteriológico de *coliformes fecales* a cada una de las pilas, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 14.

Tabla 14: Coliformes fecales en muestras de "compost".

Pila N°	Coliformes fecales NMP/g de compost
1	$2,8 \times 10^4$
2	$1,1 \times 10^3$
3	$4,0 \times 10^3$

Los resultados mostrados en la tabla superior demuestran la poca concordancia existente entre los valores de *coliformes fecales* realizados antes y después del proceso de compostaje; ya que si se observan los resultados expuestos en la tabla 11 para *coliformes*

(2.200 NMP/g lodo b.s) se obtiene durante el proceso un aumento de éstas, lo que es imposible, pues el contenido de *coliformes fecales* después del proceso de compostaje no puede ser mayor que el que presentaba el lodo antes de éste. Debido a esto, se presentó la necesidad de indagar sobre los resultados de otros análisis de *coliformes* realizados a los lodos de la misma planta (efectuados en forma paralela a los del DICTUC S.A), los cuales también fueron utilizados para realizar una experiencia piloto de compostaje a pequeña escala de similares características a las presentadas en este trabajo, encontrando antes y después del proceso los siguientes resultados:

Tabla 15: Contenido de coliformes fecales en lodo de Santa Cruz.

Microorganismo	Contenido lodo Santa Cruz
<i>Coliformes Fecales</i> (antes)	$2,3 \times 10^9$ NMP/g lodo b.s
<i>Coliformes Fecales</i> (después)	$1,3 \times 10^3$ NMP/g lodo b.s

Fuente: G. Castillo y Col. 2001.

Con la información presentada, es posible inferir que el análisis de coliformes inicial realizado por el DICTUC S.A al lodo generado por las plantas de tratamiento, por razones que se desconocen, no se ajusta a la realidad.

Los resultados de coliformes fecales citados en la tabla 15, antes del proceso de compostaje, se ajustan más a los valores descritos en literatura para el tipo de lodo en estudio, por lo que se considerará este valor para verificar el grado de eficiencia logrado en el proceso de compostaje respecto del abatimiento de coliformes fecales. Por lo tanto, basándose en el contenido de coliformes señalado en la tabla 15 ($2,3 \times 10^9$ NMP/g lodo b.s), se puede decir que el proceso de compostaje logra una reducción importante del contenido de *coliformes fecales* en el lodo, permitiendo este tratamiento obtener un lodo Clase B ($< 2.000.000$ NMP/g lodo b.s), muy cercano a la clasificación A (< 1000 NMP/g lodo b.s), siendo probable alcanzar esta última clasificación (por el bajo contenido de *coliformes*) en la etapa de curado.

Cabe destacar el valor semejante de coliformes que se obtiene en ambas experiencias al finalizar el proceso de compostaje, lo que viene a validar la efectividad de la técnica empleada.

De requerirse mayor información respecto del comportamiento de las variables mencionadas u otras (pH, humedad, etc.) se recomienda consultar el anexo 2 y el trabajo desarrollado por G. Castillo y col. 2001, citado en bibliografía.

2.1.2 ORGANIZACIÓN Y SUPERVISIÓN DE LA PLANTA

Las principales funciones a realizar en la planta de compostaje, corresponden a la operación y mantención de los equipos, control de procesos y administración. La administración corresponde a un nivel técnico, que está a cargo de la supervisión de las funciones y operaciones de la planta. El personal encargado debe además, elaborar informes mensuales, los cuales pueden ser eventualmente exigidos por organismos fiscalizadores como la Superintendencia de Servicios Sanitarios, Servicio de Salud, etc. y mantener contacto directo con los proveedores, contratación de servicios, entre otros.

En cuanto al control del proceso, este debe ser supervisado periódicamente para lograr mantener las condiciones de operación óptimas, por lo que la calidad del compost final producido en la planta no sólo depende de la materia prima y equipos involucrados, sino que también de la organización del personal. El personal de planta requerido consiste básicamente en:

- Administrador de ventas

Esta persona estará encargada de todos los trámites de compra - venta, ya sea para la compra del material de enmienda o para la venta del compost producido, además de las obligaciones propias de su profesión, como llevar un control de todas las salidas y entradas de dinero en la planta.

- 2 Operadores técnicos

Los operadores estarán encargados de manipular el material desde que entra a la planta hasta que sale de ella, para ello se ha contemplado la utilización de maquinaria como

cargadores frontales que permitan el desplazamiento del material dentro de las distintas etapas de la planta.

- 1 vigilante

Como en todo lugar donde existe manipulación de dinero, material combustible (en el caso de las virutas de madera) y maquinaria pesada de gran valor, es necesario contar por lo menos con el cuidado nocturno del lugar para evitar la acción de malhechores.

- Profesional

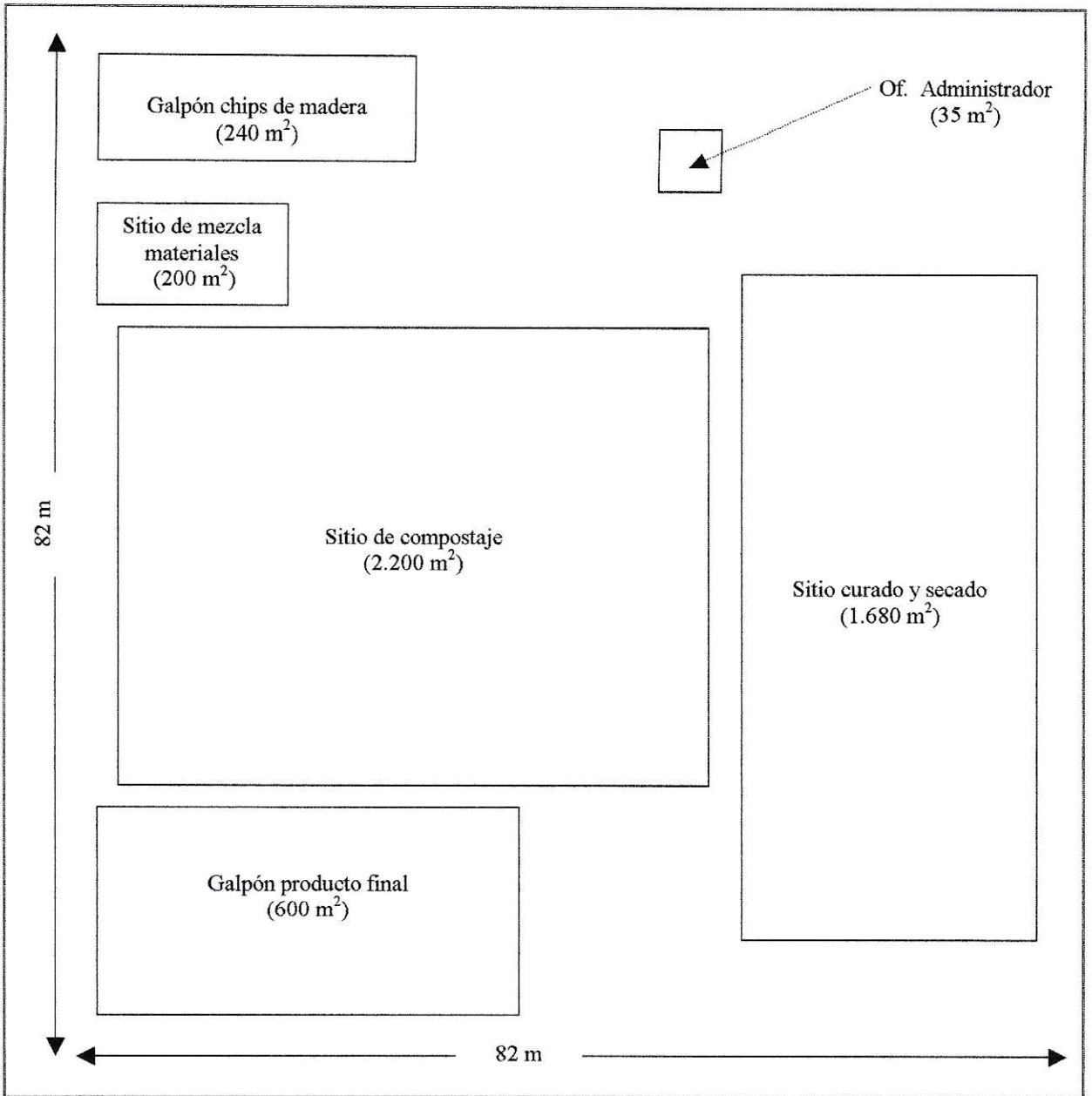
La presencia de un ingeniero en recursos naturales renovables, agrónomo, Qco. ambiental u otro con conocimientos sobre el tema, es necesaria sólo una o dos veces por semana para la supervisión general del proceso, además de ser imprescindible en el comienzo para implementar la metodología, generar un manual de procedimientos y enseñar conocimientos básicos sobre el proceso al personal que se encontrará presente diariamente en la planta.

2.1.1.1 Distribución de equipos

La distribución de las secciones de la planta de compostaje es un aspecto importante para lograr un correcto funcionamiento del proyecto una vez en marcha. Dentro de éstas es imprescindible considerar los equipos que se deben utilizar para evitar una mala operación bajo los supuestos de diseño. Las secciones que se requieren para la planta se mencionan a continuación y su distribución se presenta en la figura 9.

- Oficina de administración (oficinas de venta, contabilidad, baños, etc).
- Galpón de almacenaje de chips de madera (debe contar con las señalizaciones respectivas como por ejemplo, no fumar, material combustible, etc.; además de contar con extintores).
- Sitio de mezcla para el lodo y el material de enmienda.
- Sitio para la etapa de compostaje y curado.
- Galpón para almacenar el producto final.

Figura 9: Distribución de la planta de compostaje.



2.2 MONO - RELLENO

Una vez que se ha realizado la elección del tipo de relleno a utilizar para disponer los lodos, es indispensable conocer todas las especificaciones de instalación y procedimientos que se deben llevar a cabo. Dichas especificaciones, se presentan a continuación:

2.2.1 INSTALACIÓN DEL RELLENO CON ZANJAS

Mediante la información descrita sobre mono - depósitos en la sección marco teórico, y de acuerdo a la producción de lodos estimada en la tabla 7 y 8 para las plantas de tratamiento de aguas servidas de Población y Santa Cruz, respectivamente, es posible determinar las dimensiones de las zanjas, del material impermeable (geomembrana) y del terreno total que se necesitará para disponer los lodos en un mono - depósito por un período de 10 años.

Para diseñar el mono - depósito, se ha considerado un espacio de 4 m cada 2 zanjas y entre éstas un espacio de 1,2 m. Cada zanja tiene aproximadamente 60 m de largo, y una profundidad y un ancho de 2 m; de los 2 m de profundidad sólo se rellenarán con lodos 1,70 m y el resto será ocupado por la cubierta, la cual es parte de la misma tierra que se sacó para formar la zanja. Como se mostró en la figura 8, la cubierta deberá superar la altura del terreno original, puesto que a medida que pasa el tiempo ésta va descendiendo.

El talud seleccionado para aplicar en la zanja es el nº4 de la figura 7, porque permite maniobrar más fácilmente tanto el material a depositar como el material para impermeabilizar la zanja.

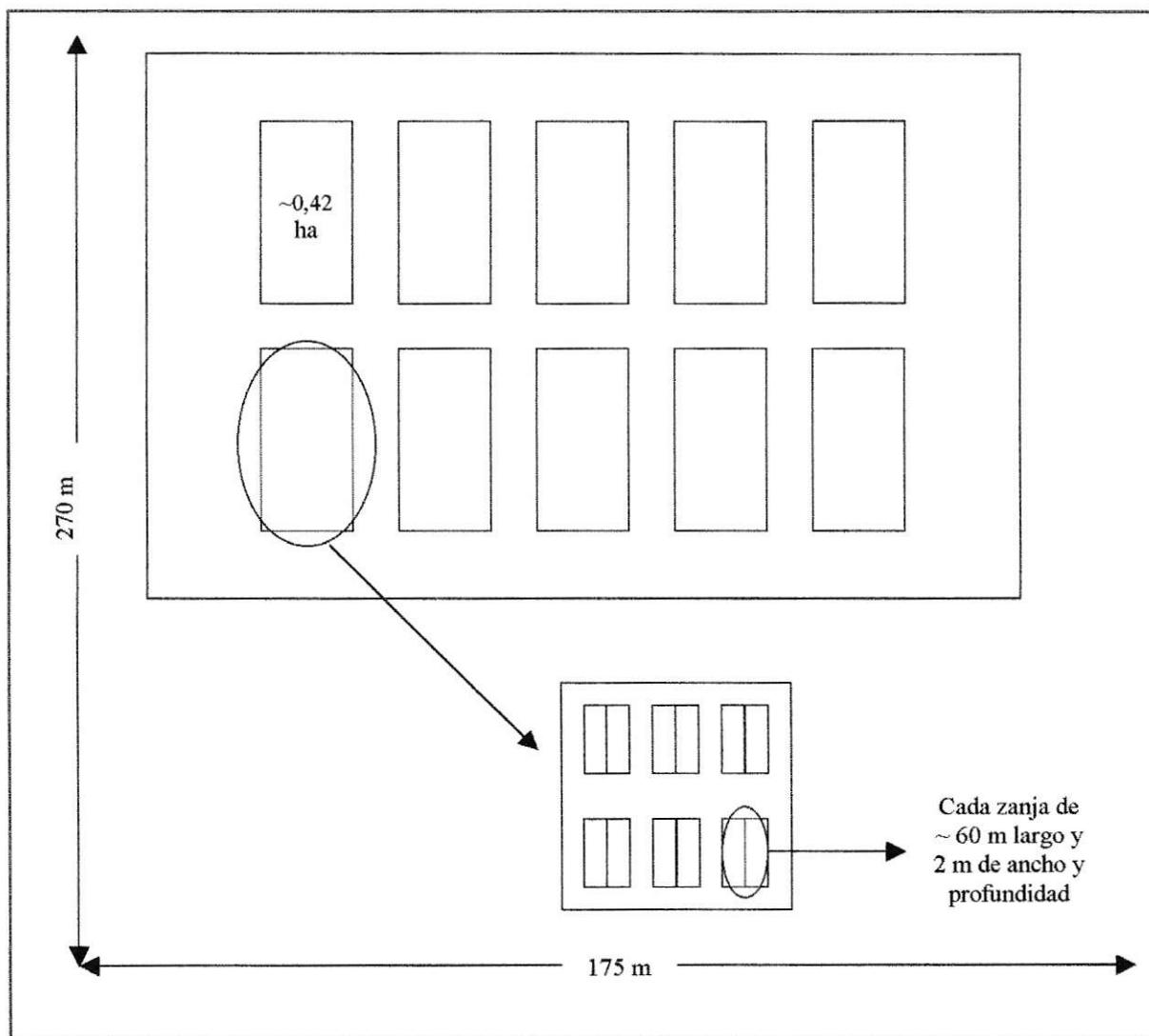
Las dimensiones de la geomembrana a utilizar deberán contemplar además el ancho y largo suficiente para que ésta sobresalga de la zanja por lo menos 50 cm por lado, con la finalidad de evitar que el lixiviado fluya por el lado de la zanja.

En la figura 10 se muestra un esquema general del relleno con zanjas, considerando una vida útil de 10 años.

La forma de aplicar el lodo depende del tipo de vehículo y de la estabilidad de la pared lateral de la zanja, la cual dependerá al mismo tiempo del terreno en que se esté trabajando. En general, las paredes laterales son suficientemente estables y el lodo puede descargarse directamente desde el vehículo. Sin embargo, si las paredes no fueran lo suficientemente

estables, el lodo debe colocarse en la zanja a través de un conducto de extensión similar a los que tienen los camiones mixel o debe ser bombeado mediante bombas portátiles. En algunos casos, puede ser necesario arrojar el lodo en el terreno sólido cerca de la zanja y luego empujarlo al interior mediante una maquinaria adecuada.

Figura 10: Esquema general del relleno con zanjas propuesto.



De abordar el proyecto con el diseño expuesto, es imprescindible que se hagan pruebas para determinar si el diseño elegido es factible de realizar en las condiciones existentes.

2.2.1.1 Maquinaria y personal necesarios en el relleno

En los rellenos puede usarse una amplia variedad de maquinarias. La selección de ésta depende del método de relleno, de las dimensiones del diseño y de la cantidad de lodo que se recibe.

En cuanto al personal necesario, es importante que sea calificado y bien entrenado para realizar una labor eficiente. Los siguientes son los cargos comunes del personal que se necesitan en el relleno:

- Operador de la maquinaria

En muchos de los sitios éste será el único personal necesario, ya que será el encargado de manejar el lodo dentro del relleno. Otra función importante que este operador debe realizar es mantener un cuaderno de anotaciones en el cual presente el detalle diario de los lodos que entran al lugar, ya que es información importante tanto para la propia empresa como para presentarla ante una petición de un organismo fiscalizador.

- Profesional

El profesional encargado puede ser un ingeniero o un constructor civil, cuyo cargo consiste básicamente en vigilar todos los aspectos de la operación del relleno, incluyendo la administración de los insumos (geomembrana, desinfectantes, etc) y de la maquinaria en caso de necesitarse. Debido a su función, este profesional no es imprescindible diariamente en el lugar, por lo que se han contemplado 2 o 3 visitas semanales.

2.2.2 PROCEDIMIENTOS ESPECÍFICOS DE INSTALACIÓN DEL MÉTODO

- Preparación del sitio

La preparación incluye todas las tareas que se necesitan antes de recibir el lodo, es decir, limpiar la zona y desmalezarla, nivelar el sitio, construir caminos de acceso y excavar las zanjas, las cuales se instalan eficientemente construyéndolas en forma progresiva.

- Descarga del lodo

Por lo general, el lodo se descarga desde los vehículos arrojándolo directamente sobre la zanja, pero también pueden usarse tuberías metálicas o bombas; esta descarga puede ocurrir a lo largo de ambos lados de la zanja, por lo que deben proporcionarse todas las medidas de seguridad para que los vehículos se acerquen a la zanja y puedan descargar, toda el área de descarga debe mantenerse libre de lodo y nivelarse periódicamente para facilitar las operaciones.

- Manejo del lodo y cubierta

El lodo debe distribuirse en forma uniforme a lo largo de la zanja y éstas deben llenarse sólo hasta un nivel donde no ocurra un derrame del lodo, debido al desplazamiento durante la aplicación de la cubierta; para esto las paredes de la zanja se pueden marcar a la altura máxima de relleno. Las capas iniciales de la cubierta deben ubicarse cuidadosamente para reducir al mínimo el desplazamiento del lodo. La cubierta final debería extenderse al menos 30 cm por encima de la superficie del terreno y más. A medida que se va acomodando se necesita aplicar más cubierta de suelo para evitar las depresiones y los estancamientos. Se estima que este proceso demorará de 6 a 9 meses, después de los cuales toda la zanja deberá nivelarse.

2.2.3 PROCEDIMIENTOS GENERALES DE FUNCIONAMIENTO

2.2.3.1 Prácticas de control ambiental

Deben existir controles ambientales para minimizar o eliminar los efectos que puedan producir los rellenos, controles que además de beneficiar al medio ambiente deben permitir una operación del lodo sin riesgos.

- Derrames

Es necesario limpiar rápidamente los derrames, independientemente del lugar en el que se encuentren. Para ello, es útil poder contar con caliza en el sitio.

- Evitar la erosión

Al clausurar el sitio, una nivelación, revestimiento y plantación adecuada evitan la erosión a largo plazo. Los procedimientos para clausurar un sitio y las características que éste posee pueden ser consultadas en el anexo 3.

- Barro

Generalmente el barro es causado por un drenaje inadecuado, pero también puede ser un problema en cualquier sitio durante lluvias intensas. Para reducir su efecto al mínimo, los caminos de acceso deben construirse de ripio.

- Polvo

Por lo general el polvo es causado por el viento o los movimientos de los vehículos y de la maquinaria. Como se mencionó anteriormente es posible solucionar este problema mediante la incorporación de ripio al camino. Otra forma de minimizar el problema es plantando pasto sobre las capas finales de tierra, además de evitar la construcción anticipada de las zanjas.

- Vectores (organismos portadores de enfermedades)

La mejor forma de controlarlos es utilizando una cubierta de tierra compacta lo más frecuentemente posible. En Estados Unidos han demostrado que una cubierta consistente en 1,3 cm de tierra compacta evita la aparición de moscas (Molina A. 1994).

- Malos olores

Los malos olores pueden ser un serio problema en los rellenos con lodos. Para solucionarlo, deben aplicarse cubiertas con la mayor frecuencia posible, también puede utilizarse la Cal como protección (ya que logra la inactivación de patógenos en un 99%). Otro medio efectivo para reducir los malos olores es evitar el almacenaje del lodo.

- Ruido

Las fuentes de ruido incluyen la maquinaria y los vehículos de transporte. Para reducir el efecto, debe ponerse atención en construir los caminos en áreas menos pobladas. Es ideal encontrar un área aislada de manera que el ruido no viaje hasta las viviendas vecinas. El uso de barreras de sonido como árboles y bermas de tierra puede ser muy efectivo.

- Monitoreo

El objetivo principal del monitoreo es dar cuenta de cambios que puedan producir los lixiviados tanto en aguas subterráneas como superficiales cuando se encuentran localizadas cerca del lugar de relleno. De igual forma, cuando se encuentran estructuras cercanas es indispensable establecer un control del gas que se genera en el relleno. En el anexo 3 se presentan programas de monitoreo que pueden ayudar a detectar los contaminantes mencionados.

- Aspecto estético

Para que el sitio se vea aceptable, se debe tratar de que sea compatible con sus alrededores. Durante la preparación del sitio es importante dejar todos los árboles posibles para formar una barrera visual.

- Salud

El personal del sitio debe tomar las precauciones necesarias cuando transporta, maneja o cubre el lodo. Además deben haber instalaciones para que los operarios puedan asearse en caso de contacto directo con el lodo.

- Seguridad

Como en cualquier actividad de construcción deben implementarse los métodos de seguridad de acuerdo a la legislación existente. Los caminos de accesos y las áreas de trabajo deben estar bien marcados para evitar accidentes en el sitio.

- Funcionamiento

El personal y la maquinaria deben estar disponibles al momento de recibir los camiones, con la finalidad de que el lodo esté el menor tiempo posible expuesto al aire libre.

2.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS ALTERNATIVAS

En esta sección se presentan los costos asociados a la construcción y operación tanto de la planta de compostaje como del mono – relleno (tabla 16 y 17 respectivamente). En ambos casos, los costos serán divididos en costos de inversión y de operación. Los costos de inversión consideran todos los gastos iniciales para estructurar la planta de compostaje, sin considerar los costos que se harán cuando entre en funcionamiento la planta, ya que estos últimos constituyen los costos de operación.

Tabla 16: Costos planta de "compostaje".

COSTOS DE INVERSIÓN			
COSTOS DIRECTOS		COSTOS INDIRECTOS	
Costo	Valor en M\$	Costo	Valor en M\$
Maquinaria Camión tolva (6-7 m ³) Cargador retroexcavador (1 m ³)	24.000 31.200	Ingeniería (3% de los costos directos de inversión)	4.800
Construcción Oficina (35 m ²) Galpón y bodega (840 m ²) Terreno (0,68 há)	7.700 86.200 10.500	Imprevistos (8% de los costos directos de inversión)	12.800
Total Costo Directo de Inversión	160.000	Total Costo Indirecto de Inversión	17.600
COSTOS DE OPERACIÓN			
Costo	Valor en M\$		
Materia prima Chips de madera (337 t/año)	10.400		
¹ Agua (1.609 m ³ / año)	280		
² Energía eléctrica (11.540 KWh/año)	462		
Mantenimiento (5% del valor del equipo)	2.760		
Personal ³ Profesional Administrador 2 Operadores técnicos Vigilante	12.470 1.730 2.950 6.040 1.750		
Total Costo de Operación	26.400		

¹ Se considera que cada persona utiliza alrededor de 50 L/día.

² Se supone una iluminación de 5 W/m² para el galpón y la bodega, y de 10 W/m² para la oficina.

³ Este profesional puede ser un Ing. Agrónomo, Ing. en recursos nat. Renovables, Qco. Ambiental u otro con conocimientos sobre el tema, y se necesitará sólo 2 o 3 veces por semana para supervisar el proceso.

Tabla 17: Costos mono - depósito.

COSTOS DE INVERSIÓN			
COSTOS DIRECTOS		COSTOS INDIRECTOS	
Costo	Valor en M\$	Costo	Valor en M\$
Maquinaria Camión tolva (6-7 m ³) Cargador retroexcavador (1 m ³)	24.000 31.200	Ingeniería (3% de los costos directos de inversión)	3.900
Construcción Oficina (25 m ²)	2.570	Imprevistos (8% de los costos directos de inversión)	10.400
Terreno (4,8 há)	72.000		
Total Costo Directo de Inversión	130.000	Total Costo Indirecto de Inversión	14.300
COSTOS DE OPERACIÓN			
Costo	Valor en M\$		
Insumos Geomembrana (4.965 m ² /año)	12.000		
Agua (55 m ³ / año)	10		
Energía eléctrica (730 KWh/año)	29,2		
Mantenimiento (5% del valor del equipo)	2.760		
Personal 1 Profesional	7.770 1.730		
2 Operadores técnicos	6.040		
Total Costo de Operación	22.500		

¹ Este profesional puede ser un Ingeniero, constructor civil u otro profesional con conocimientos sobre el tema, y se necesitará sólo 2 o 3 veces por semana para supervisar el proceso.

2.3.1 FLUJO DE COSTOS

Mediante los costos presentados anteriormente es posible realizar el flujo de costos para ambos proyectos, los cuales se presentan en las tablas 18 y 19, que se muestran a continuación:

DISCUSIÓN

La caracterización de los lodos resulta ser una herramienta indispensable para tomar decisiones basadas en los requisitos presentes en el anteproyecto de reglamento para el manejo de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de aguas (CONAMA. 2000); por ello, para caracterizar los lodos se debe procurar contratar laboratorios que posean experiencia en los análisis a realizar, o en su defecto contar con instalaciones propias que permitan realizar los análisis requeridos, además de establecer un muestreo constante durante un período de tiempo representativo, con la finalidad de dar mayor confiabilidad al momento de interpretar los resultados.

Respecto a lo anterior, es importante señalar la carencia de laboratorios especializados en análisis de lodos, específicamente en el área microbiológica, por lo que en nuestro país existe la necesidad de crear éstas instalaciones y desarrollar capacidades técnicas que satisfagan las exigencias que las nuevas normativas nos imponen.

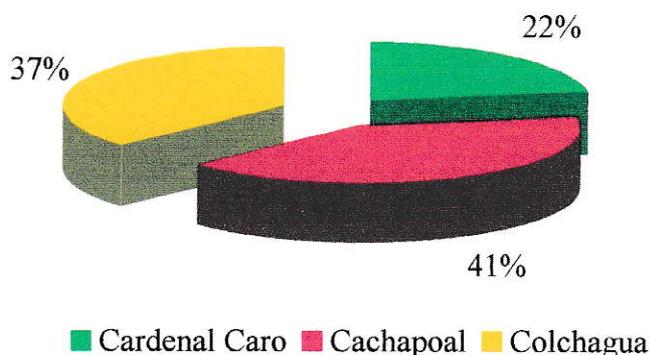
Los resultados de los análisis efectuados a las muestras de lodo son favorables para optar a distintas alternativas de disposición, pero como abaratar costos constituye uno de los eslabones principales para mantener la economía de una empresa y su permanencia en el tiempo, es que se ha estudiado solamente el "compostaje" y el mono - depósito como medio de eliminación del lodo generado por las plantas de tratamiento de aguas servidas de Población y Santa Cruz. En un principio, se podría haber pensado en la aplicación directa del lodo al suelo; no obstante, se consideraron las restricciones que esta alternativa trae asociadas, tales como elegir un lugar de aplicación a una distancia prudente de seres humanos y animales, el período de aplicación (el cual depende del tipo de cultivo) y el tiempo de reposo (sin intervención) determinado de acuerdo a la actividad que se desee realizar. Además de estas restricciones se debe tener en cuenta el lugar al que se destinará el lodo, es decir, quien estará dispuesto a recibirlo bajo los permisos correspondientes, lo que representa obstáculos; primero, porque mucha gente desecha la posibilidad de utilizar el lodo en sus plantaciones, sobre todo si son alimenticias, sólo por pensar en la procedencia de éste, y segundo, porque

conseguir permisos de los organismos relacionados con el tema (SAG, Servicio de Salud, CONAF, etc.), por no haber un procedimiento claramente establecido ni una coordinación entre ellos, demanda tiempo y largas tramitaciones que no siempre tienen buenos resultados. Esto, sumado a la distancia diaria de transporte y la baja carga de lodo generada (ya que no se puede amontonar por ser insalubre), habrían terminado demostrando que esta alternativa no es viable. Otra alternativa que a primera vista resultaba interesante profundizar era la disposición conjunta del lodo con basura domiciliaria en el vertedero para residuos sólidos urbanos Colihues La Yesca, la cual fue descartada porque el Servicio de Salud Sexta Región, ante una consulta efectuada por ESSEL S.A., indicó que en la región no existen vertederos autorizados para tal efecto.

Al realizar la evaluación económica de las alternativas propuestas, "compostaje" y "mono - depósito", se obtuvo un Valor Actual de Costos (VAC) para ambos proyectos con la finalidad de poder definir cual de los dos era más viable económicamente, lo que queda representado por el mayor VAC. Sin embargo, dadas las características de los proyectos es de esperar que ninguno de ellos genere ganancias, por lo que el costo de dar una disposición adecuada a los lodos generados por las plantas de tratamiento de Población y Santa Cruz deberá ser asumido completamente por la empresa.

Si bien el mono - depósito propuesto resulta ser la alternativa más ventajosa económicamente para la empresa, se debe señalar que la utilización del lodo en la agricultura, previo proceso de "compostaje", constituye la alternativa más atractiva de acuerdo a la realidad socio - económica de la región (en este contexto, es necesario establecer mecanismos o procedimientos que permitan dimensionar en su real magnitud los beneficios de la aplicación del compost a los distintos tipos de suelos, como por ejemplo: uso eficiente del agua, aumento de productividad, mayor disponibilidad de terrenos para uso agrícola, etc.), pues, como se observa en la figura 11, en ésta se encuentran 431.297,3 há de uso agrícola distribuidas entre las provincias de Cardenal Caro, Cachapoal y Colchagua, además de plantaciones forestales cuya superficie regional alcanza el 45,8% (CONAMA - CONAF. 1999).

Figura 11: Terrenos destinados a uso agrícola en la sexta región.



Para mantener la producción de los terrenos, los propietarios se han visto en la necesidad de incorporar fertilizantes inorgánicos a éstos para evitar la pérdida de producción vegetativa como consecuencia de su degradación, contribuyendo a modificar las características de los suelos en que han sido aplicados, puesto que los fertilizantes generalmente carecen de un refinado adecuado por el encarecimiento que ello supone, presentando elementos que son generalmente acumulativos y con toxicidad variable de acuerdo a las características de cada uno y del suelo que los recibe.

Por las razones expuestas se cree que el "compost" podría ser considerado sustituyente de los fertilizantes inorgánicos, minimizando los daños que éstos generan, ya que además de tener una mejor composición aporta ayuda al suelo aumentando su porosidad y con ello su capacidad de retención de agua, lo que se traduce en un beneficio tanto para el suelo como para la vegetación que sustenta. De esta forma, se estará entregando ayuda para llevar a cabo un manejo adecuado de los suelos agrícolas por parte de los propietarios, manejo que permitirá mejorar el medio físico - químico y microbiológico del suelo. Y se contribuirá además a proteger el suelo que se encuentra en este momento desprovisto de normativa.

El "compost" no es un producto de elaboración reciente, pero su antigua existencia no ha provocado un uso masivo en las actividades agrícolas, limitándose generalmente a actividades ornamentales. Ante esto, se debe estimular la posibilidad de utilizarlo a gran escala en la agricultura para lograr colaborar con el bien común, teniendo siempre en cuenta

los cuidados que esto implica, puesto que la capacidad de almacenar de los suelos es limitada, lo que implica manejar la aplicación del "compost" de acuerdo a las posibilidades del suelo y al tipo de cultivo que se desarrolla en él.

La construcción de un mono - depósito para la disposición final del lodo generado por las plantas de tratamiento de aguas servidas de Población y Santa Cruz, constituye un ahorro económico que beneficia a la empresa pero que puede llegar a ser perjudicial para la población y el medio ambiente de no tomar las medidas necesarias para su manejo; ante la falta de información y conocimiento sobre el manejo de este proyecto, como ha sucedido otras veces en casos similares de disposición de residuos, la población aledaña al lugar tenderá a provocar conflictos que expresen su negación a éste por sentir que invaden su medio con residuos que provocan daños a la salud, reaccionando agresivamente para proteger su calidad de vida, que sienten amenazada no solamente por las posibles enfermedades que pueda provocar sino también por el paisaje que se espera observar y los posibles olores que puedan llegar al lugar en el que habitan, el cual podría ser más o menos intenso de acuerdo a la ubicación del depósito y la dirección del viento. En cuanto al daño ambiental, podría ser severo, pues en un proyecto de este tipo existe peligro por posible contaminación de las aguas subterráneas, atribuida principalmente al lixiviado generado por los residuos que contiene el depósito. Este lixiviado se torna peligroso debido a componentes como metales pesados y compuestos nitrogenados, de los cuales el de mayor preocupación es el nitrato por el peligro que representa para la salud, puesto que se reduce en el intestino pasando a nitritos e incluso a nitrosaminas, productos ambos tóxicos, siendo éstas últimas cancerígenas (Seoánez. 1999). Sin embargo, cuando el proyecto contempla en su manejo todos los cuidados necesarios tanto en el aspecto social como ambiental y los cumple cabalmente, es posible evitar este tipo de problemas. Por esta razón, es que también este estudio se orientó a dar énfasis en aquellas condiciones que se requieren para lograr una disposición de los lodos que resulte sanitariamente aceptable, tanto para la población como para el medio ambiente.

CONCLUSIÓN

Basándose en los antecedentes expuestos anteriormente, se concluye que desde el punto de vista económico es más conveniente para la empresa disponer los lodos en un mono - depósito. No obstante, es importante no caer en el sesgo económico, ya que las valoraciones deben considerar los aspectos sociales, económicos y ambientales con igual importancia. Razón por la cual, desde el punto de vista de la sustentabilidad ambiental, resulta más adecuado emplear el compostaje como medio para obtener, a partir del lodo, un producto estable, valioso para la agricultura por su contenido en materia orgánica y macronutrientes tales como fósforo, nitrógeno y potasio, entre otros.

Todos los antecedentes que se han presentado en este trabajo de una u otra forma son posibles de realizar en nuestro país haciendo uso de tecnologías que se encuentran disponibles para enfrentar proyectos de este tipo, por lo que la alternativa que se adopte dependerá exclusivamente de los principios en que se basa la empresa para tomar decisiones de esta envergadura, decisiones que debieran considerar los impactos positivos y negativos asociados a cada alternativa desde un comienzo. Por lo que, de elegir el compostaje para utilizar los lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas servidas, se deberá tener presente con antelación la generación de impactos socio - económicos y ambientales. Los impactos socio - económicos que pueden emerger son considerados positivos, ya que la utilización del "compost" incrementa la productividad de las plantaciones, eleva el potencial productivo de suelos degradados y reduce los costos de producción por el reemplazo de parte de los fertilizantes comerciales. Para fortalecer el aspecto social, se debe informar y hacer participar a la comunidad mediante el establecimiento de un centro demostrativo, en el cual se de a conocer a ésta la importancia de la producción del compost, el procedimiento de elaboración y los beneficios de su utilización.

El impacto ambiental que genera la utilización del compost también es favorable, ya que se encuentra una forma amigable de utilizar (eliminar) los lodos generados por las plantas de tratamiento y de contribuir al mantenimiento de los equilibrios biogeoquímicos. Sin

embargo, a pesar de que el compost es considerado como un producto de alta calidad y con múltiples propiedades beneficiosas para el sistema suelo, es indispensable demostrar los beneficios a través de investigaciones que determinen objetivamente el valor y la utilidad tanto de los lodos chilenos en la elaboración del "compost" (contemplando estudios experimentales que permitan complementar el ya realizado, es decir, estudios que proporcionen información sobre otros factores que forman parte del desarrollo óptimo del proceso, definidos en el anexo 2, como por ejemplo pH, humedad, etc.), como de este "compost" en los diferentes tipos de suelos chilenos.

De igual forma, si se considera el mono - depósito como alternativa de disposición final de los lodos, se tendrá que contemplar el diseño óptimo de acuerdo a las condiciones existentes en el terreno elegido para evitar impactos negativos al medio, y considerar además que éste se puede ver condicionado por la presión que ejerce la comunidad sobre la notificación de la existencia de un relleno en las proximidades de la zona, variable que pesará de modo significativo en el emplazamiento final. Para minimizar o eliminar tales acciones se debe hacer participar desde un principio a la comunidad en la realización del proyecto, planteando como objetivo de esta participación, que la comunidad comprenda la necesidad de un relleno de este tipo, mantenerla informada sobre las diferentes actividades, y solicitar las opiniones y percepciones relevantes de los ciudadanos involucrados con el desarrollo de éste, ya que la participación activa del pueblo en la toma de decisiones puede llevar a solucionar problemas reales que pueden afectar al medio ambiente.

Disponer o utilizar los lodos de manera controlada será una solución viable siempre que se cumpla con las normas y exigencias de protección ambiental, puesto que sólo de ésta forma se puede evitar la generación de impactos negativos sobre el ambiente.

Finalmente, es recomendable que la empresa invierta en la implementación de un laboratorio que proporcione la ayuda necesaria para realizar los análisis que se requieran de acuerdo a la disposición o utilización del lodo generado por sus plantas de tratamiento de aguas servidas, ya que esta iniciativa permitirá, en lo posible, determinar y/o controlar adecuadamente las variables o parámetros de interés, logrando de esta forma resultados más representativos y confiables.

BIBLIOGRAFÍA

AIDIS-CHILE. 2001. XIV congreso de ingeniería sanitaria y ambiental. Lodos provenientes de plantas de aguas servidas, potencialidades y restricciones; temores y realidades. Pág. 3-4. Octubre, Santiago, Chile.

Astudillo P. y Díaz D. 1999. Diseño de una planta de compostaje de lodos de lagunas de estabilización. Cap. 1-2-3, págs. 10, 47-50, 65. Tesis de Título, Universidad Católica de Valparaíso, Chile.

Castillo G. y col. 2001. Acondicionamiento de biosólidos mediante compostaje. XIV congreso de ingeniería sanitaria y ambiental. Pág.4. Octubre, Santiago, Chile.

CCHEN. 1996. Irradiación de lodos provenientes del tratamiento de aguas servidas para su desinfección. Pág. 31. Marzo, Santiago, Chile.

CONAMA. 2000. Anteproyecto de reglamento para el manejo de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de aguas. Pág. 5, 9. 12 Junio, Santiago, Chile.

CONAMA - CONAF. 1999. Catastro y evaluación de recursos vegetacionales nativos de Chile, informe regional sexta región. Pág. 3. Contempo gráfica, 1° edición, Chile.

Costa F. y col. 1987. Utilización agrícola de lodos de depuradora. Consejo superior de investigaciones científicas. Cap. 3, pág. 52. Gráficas Zerón, 1° edición, España.

Hernández A. 1996. Depuración de aguas residuales. Cap. 10, pág. 765-769. Colección Señor N° 9, 3° edición, Madrid, España.

INTEC.CHILE. 1999. Manual de compostaje. Corporación de investigación tecnológica. Cap. 2, págs. 13-21. Santiago, Chile.

Metcalf Eddy. 1981. Tratamiento y depuración de las aguas residuales. Cap. 12, pág 953. Editorial M^c Graw Hill, México.

Molina A. 1994. Pautas para el diseño de un relleno sanitario de lodos residuales urbanos. Cap. 1 y 3, págs. 23,76. Tesis de Título, Universidad Católica de Valparaíso, Chile.

Ramallo R.S. 1996. Tratamiento de aguas residuales. Cap. 2, pág. 71. Editorial Reverté, España.

Seoáñez M. 1999. Contaminación del suelo. Cap. 39, pág. 15. Ediciones Mundi - Prensa, España.

Seoáñez M. 1998. Medio ambiente y desarrollo, manual de gestión de los recursos en función del medio ambiente. Cap. 50, pág. 440. Ediciones Mundi - Prensa, España.

Toledo y Zapater. 1991. Geografía general y regional de Chile. Cap. 3 y 7, págs 131, 348. Edit. Universitaria, Santiago, Chile.

Sitios Web:

http://www.idrc.ca/library/water/index_e.html

<http://www.ine.gob.mx/dgra/normas/agua/>

<http://media.payson.tulane.edu:8083/html>

<http://www.solomujeres.com>

Anexo 1

NORMATIVA NACIONAL

A. Anteproyecto de reglamento para el manejo de lodos no peligrosos

Fundamentos

- Prevenir eventuales impactos negativos estableciendo las condiciones para el correcto tratamiento y una adecuada disposición de los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas.

Objetivos

- Regular el manejo sanitario de lodos no peligrosos provenientes de plantas de tratamiento de aguas.
- Regular el uso y manejo de lodos no peligrosos en la agricultura, cuando sus condiciones físicas, químicas y biológicas lo permitan.

Alcances del reglamento

El reglamento se refiere a lodos no peligrosos generados por:

- Plantas de tratamiento de agua potable
- Plantas de tratamiento de aguas servidas (incluyendo fosas sépticas)
- Plantas de tratamiento de residuos industriales líquidos

Temas que aborda el reglamento

- I. Utilización de lodos en la agricultura
- II. Manejo sanitario del lodo
- III. Permisos, documentación e Informes
- IV. Plazo para el cumplimiento de las regulaciones
- V. Procedimientos de muestreo, medición y análisis
- VI. Fiscalización

Definiciones

El reglamento define una serie de términos relacionados con el tema del manejo de lodos, dentro de los cuales podemos destacar:

- **Agricultura:** Actividad de siembra, plantación y cosecha, producción animal y silvicultura.
- **Atracción de vectores:** Característica de los lodos que los hacen atractivos para roedores, moscas, mosquitos u otros organismos capaces de transportar y transmitir agentes infecciosos.
- **Lodo:** Acumulación de sólidos orgánicos sedimentables separados en los distintos procesos de tratamiento de aguas.
- **Lodo Clase A:** Aquellos aptos para uso agrícola sin restricciones por razones sanitarias.
- **Lodo Clase B:** Aquellos aptos para uso agrícola, con restricciones de aplicación según tipo y localización de los suelos o cultivos.
- **Lodo crudo:** Aquellos removidos durante las distintas etapas de tratamiento de aguas y que no han sido objeto de proceso de estabilización. (No aptos para uso agrícola.)
- **Lodo deshidratado:** Aquellos sometidos a procesos de secado, logrando un porcentaje de humedad igual o inferior al 70% por peso.
- **Lodo estabilizado:** Aquellos sometidos a procesos de tratamiento para evitar la putrefacción y la atracción de vectores.
- **Lodo higienizado:** Aquellos sometidos a un proceso para eliminar gérmenes patógenos.
- **Lodo no peligroso:** Aquellos que no presentan ninguna característica de toxicidad, toxicidad por lixiviación, reactividad, inflamabilidad o corrosividad.
- **Manejo Sanitario:** Manipulación de lodos provenientes del tratamiento de aguas, relativo a operaciones de almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento, utilización y disposición final, con el objeto de evitar riesgos para la salud de la población, flora, fauna y al medio ambiente.
- **Mono relleno para lodos:** Instalación para la disposición final de lodos no peligrosos.
- **Relleno Sanitario:** Instalación para la disposición final de residuos sólidos en el suelo con tratamiento de impermeabilización, que no origina molestias ni peligros para la salud, seguridad pública y el medio ambiente, y que utiliza principios de ingeniería para confinar los residuos en un área determinada, reduciéndolos al volumen más pequeño posible.
- **Tasa agronómica:** Tasa de aplicación de lodos al suelo, considerando la provisión de las necesidades de nitrógeno de la vegetación y reduciendo la cantidad de nitrógeno que infiltra hacia aguas subterráneas.

I UTILIZACION DE LODOS EN LA AGRICULTURA

El reglamento establece las condiciones técnicas de operación, monitoreo y seguimiento de lodos destinados a uso agrícola, con el fin de evitar efectos nocivos a la salud de la población, flora, fauna y suelo, en consideración a:

1. Características de los lodos

Comprende criterios:

1.1 Sanitarios

- Reducción del contenido de patógenos:

Lodos **clase A**:

Tabla 1 Requisitos microbiológicos para lodos clase A.

Microorganismo	Densidad
Coliformes fecales	< 1.000 NMP/g de lodo base seca
Salmonella sp.	< 3 NMP/4 g de lodo base seca
Huevos de Helminto	< 1 huevo/4 g de lodo base seca
Virus MS-2	< 1 UFP/4 g de lodo base seca

Se entenderá que se cumple Huevos de Helminto y Virus MS-2 si se verifican las condiciones de operación de al menos uno de los procesos conducentes a una reducción *importante* de patógenos que se señalan a continuación:

Compostaje: Si se aplica el método de compostaje no confinado o en pilas estáticas aireadas, la temperatura de los lodos deberá mantenerse a 55°C o más, por tres días. Si se aplica el método de compostaje con pilas, la temperatura de los lodos deberá mantenerse a 55°C o más, por un período de 15 días. Durante dicho período las pilas deberán ser volteadas un mínimo de 5 veces.

Secado por calor: Secado de los lodos por contacto directo o indirecto con gases a mayor temperatura para reducir el contenido de humedad de los lodos a un 10% como mínimo. La temperatura de las partículas de los lodos deberá exceder los 80°C o bien la temperatura de los gases en contacto con los lodos, en el punto en el que los lodos dejan el secador, deberá exceder los 80°C.

Tratamiento con calor: Los lodos en estado líquido se calientan a una temperatura de 180 °C o más por 30 minutos, como mínimo.

Digestión Aeróbica Termofílica: Los lodos en estado líquido son agitados con aire u oxígeno para mantener las condiciones aeróbicas con un tiempo medio de residencia de 10 días a una temperatura entre 55°C y 60°C.

Irradiación con haces de electrones: Los lodos son irradiados con haces de electrones de alta energía provenientes de un acelerador de electrones, con una dosis mínima de 10KGy (1megarad) a temperatura ambiente (20°C).

Irradiación con rayos Gamma: Los lodos son irradiados con rayos Gamma de ciertos isótopos, tal como Cobalto 60 o Cesio 137, con una dosis mínima de 10 KGy (1 megarad), a temperatura ambiente (20°C).

Pasteurización: La temperatura de los lodos se mantiene por sobre los 70°C por un período superior a 30 minutos.

Tratamiento alcalino, mediante acondicionamiento con cal: El pH del lodo es elevado a niveles por sobre 12, durante un período no inferior a 72 horas. Durante dicho período la temperatura del lodo deberá ser superior a 52°C por un período no inferior a 12 horas. Adicionalmente, después de transcurridas las 72 horas, el lodo deberá secarse hasta obtener un contenido de sólidos de 50% o menos.

Lodos clase B

La media geométrica de la densidad de coliformes fecales producto de un análisis de un número de muestras igual o mayor a 7 debe ser menor a 2.000.000 NMP/g de lodo base seca.

Este requisito se entenderá que se cumple si se verifican las condiciones de operación de al menos uno de los procesos que permiten una reducción *significativa* de patógenos, éstos son:

Digestión Aeróbica: Los lodos se agitan con aire u oxígeno para mantener condiciones aeróbicas durante un tiempo de residencia promedio a una temperatura específica. El tiempo de residencia promedio y la temperatura deberán ser de 40 días a 20°C, o bien de 60 días a 15°C.

Secado al aire: Procesos de secado sobre una cama de arena o en piscinas de poca profundidad. El proceso de secado debe comprender un tiempo mínimo de tres meses, durante dos de los cuales, la temperatura ambiente debe ser superior a 0°C.

Digestión Anaeróbica: Los lodos son tratados en ausencia de aire, con un período de residencia medio y una temperatura específica. Los valores del tiempo de residencia medio y temperatura serán de 15 días entre 35°C y 55°C o de 60 días a 20°C.

Compostaje: Usando el método de compostaje no confinado, pilas aireadas estáticas o pilas estáticas, la temperatura mínima de los lodos será de 40°C por 5 días. Durante 4 horas en el período de cinco días, la temperatura del compost deberá exceder los 55°C.

Estabilización con cal: Procedimiento en el cual se agrega cal (Carbonato de calcio, CaCO_3) para mantener el pH de los lodos en 12 durante un período no inferior a 2 horas.

- Reducción del potencial de atracción de vectores sanitarios

La aplicación de lodos a suelos de uso agrícola, forestal, lugares públicos y en la recuperación de suelos degradados, deberá cumplir uno de los siguientes requisitos respecto de la reducción de atracción de vectores sanitarios:

Reducción del contenido de sólidos volátiles: La masa de sólidos volátiles en los lodos deberá ser reducida como mínimo en un 38% durante el tratamiento de éstos.

Tasa máxima específica de oxígeno para lodos de digestión aeróbica: La tasa específica de consumo de oxígeno para lodos tratados mediante un proceso aeróbico debe ser igual o inferior a 1,5 mg de oxígeno por hora por gramo de lodos totales en peso seco, a una temperatura de 20°C.

Procesos aeróbicos con temperaturas mayores a 40°C: Los lodos deben ser tratados aeróbicamente por 14 días o más, período durante el cual la temperatura debe ser superior a 40°C y la temperatura media debe ser superior a 45°C.

Adición de material alcalino: El pH de los lodos debe ser elevado a 12 o más mediante agregación de material alcalino. Sin adición de más material alcalino, el pH deberá mantenerse a 12 o más por 2 horas y posteriormente a 11,5 o más por 22 horas adicionales.

Reducción de humedad: En caso que los lodos no contengan lodos crudos provenientes de un tratamiento primario de residuos líquidos, el porcentaje de sólidos debe ser igual o superior a 75%, previo a la mezcla de lodos con otros materiales.

En caso que los lodos contengan lodos crudos provenientes de un tratamiento primario de residuos líquidos, el porcentaje de sólidos debe ser igual o superior a 90%, previo a la mezcla de lodos con otros materiales.

Inyección de lodos: Los lodos deberán ser inyectados bajo la superficie de la tierra. No pudiendo encontrarse cantidades significativas de lodos en la superficie del suelo después de una hora de la inyección de éstos. Sin perjuicio de lo anterior, lodos de clase A deberán inyectarse dentro de las ocho horas posteriores de concluido el proceso de tratamiento de patógenos.

Incorporación de lodos en el suelo: Los lodos a ser aplicados en la superficie o depositados en una instalación de disposición final, deberán ser incorporados al suelo dentro de las seis horas posteriores a su aplicación. Sin perjuicio de lo anterior, lodos de clase A deben ser aplicados o depositados dentro de ocho horas posteriores al proceso de tratamiento de patógenos.

La aplicación de lodos a prados, jardines de residencias o cuando el lodo se comercialice o entregue en sacos u otro contenedor, deberá cumplir uno de los 5 primeros requisitos mencionados anteriormente.

La aplicación de lodos provenientes de fosas sépticas particulares a suelos agrícolas, forestales o en la recuperación de suelos degradados, deberá cumplir uno de los dos últimos requisitos señalados anteriormente y se podrá considerar además como opción el tratamiento alcalino para lodos domésticos provenientes de fosas sépticas.

1.2 Contenido de metales pesados

Queda prohibida la aplicación de lodos en suelos de uso agrícola, forestal o en jardines, cuando los análisis indiquen que los contenidos totales de metales pesados sobrepasen cualquiera de las concentraciones máximas señaladas en la tabla 2.

Tabla 2 Concentraciones máximas de metales pesados en lodos de uso agrícola.

Metal	Concentración máxima en mg/Kg. de lodo (base seca) ¹
Arsénico	40
Cadmio	40
Cobre	1.500
Mercurio	20
Níquel	420
Plomo	300
Selenio	100
Zinc	2.800

¹ Concentraciones expresadas como contenidos totales

1.3 Evaluación ecotoxicológica

Para el uso en agricultura se requiere, para cada aplicación, presentar los resultados de los siguientes ensayos de toxicidad aguda, para lo cual se deberá determinar la concentración letal 50 (CL50) y/o la concentración inhibitoria 50 (CI50):

- Germinación de semillas
- Lixiviación para ensayos con microcrustáceos (*Daphnia magna* o *pulex*)
- Ensayos con lombrices de suelo

2. Características de los sitios de aplicación

Comprende:

2.1 Clases de suelo

- Suelos de uso agrícola y/o forestal, incluyendo suelos erosionados con potencial de uso agrícola inmediato
- Suelos dedicados a áreas verdes, recreacionales, parques, jardines, cementerios, etc.
- Suelos degradados sin potencial de uso agrícola inmediato.

2.2 Características de los suelos

Se prohíbe la aplicación de lodos en:

- Suelos de uso agrícola, forestal o jardines, cuyo pH sea inferior o igual a 5.
- Suelos de textura arenosa, esto es, suelos cuyo porcentaje de partículas con diámetros entre 0,050 y 2 mm sea igual o superior a 30 y el porcentaje de arcilla o partículas menores a 0,002 mm de diámetro sea inferior a 10.
- Suelos saturados con agua durante algún período del año, a manera de ejemplo: vegas, bofedales, ñadis.
- Suelos cuya napa freática se encuentre a menos de 1 metro de profundidad y en aquellos suelos en los cuales se genere un efecto de napa colgante.
- Áreas cubiertas con nieve.
- Zonas de protección de fuentes de captación de agua potable, esto es, 300 metros aguas arriba para el caso de aguas superficiales y en un radio de 300 metros tratándose de fuentes de aguas subterráneas.
- Franjas de protección de ríos y lagos, esto es, a menos de 15 metros de sus riberas.
- Suelos con riesgo de inundación.
- Suelos con pendientes superiores a 15 %. Para pendientes mayores del 2%, se exigirá un acanalado paralelo al contorno de la pendiente para evitar la erosión.

2.3 Contenido de metales pesados en suelos

En caso alguno se aceptará que los suelos susceptibles de recibir aplicaciones de lodos excedan los contenidos totales para metales contenidos en la tabla 3.

Tabla 3 Contenidos máximos de metales en suelos antes de una aplicación de lodo

Metal ¹	Contenido total en mg/Kg. de suelo en base seca		
	Zona Centro – Norte ²		Zona Sur ³
	pH > 6,5	pH < 6,5	Todo pH
Arsénico	20	12,5	10
Cadmio	2	1,25	2
Cobre	150	100	75
Molibdeno	2	3	3
Plomo	75	50	50
Zinc	175	120	175

¹ Para los otros metales mencionados en la tabla 1 no se consideran restricciones por falta de información en suelos nacionales.

² Desde la línea de la Concordia (primera región) por el norte hasta el límite norte de la sexta región por el sur.

³ Desde el límite norte de la sexta región por el norte hasta el Cabo de Hornos (duodécima región) por el sur.

3. Criterios para la aplicación

Comprende:

3.1 Tasa máxima de aplicación

La aplicación de lodos debe orientarse por criterios sanitarios, agronómicos (contenido de nutrientes requeridos por los cultivos, principalmente nitrógeno, fósforo y potasio disponibles) y por el contenido total de metales pesados, tanto en el lodo como en el suelo receptor.

Tabla 4 Tasas máximas de aplicación de lodos

Tipos de usos	Tasa máxima Ton/há.año (base seca)
Suelos agrícolas y forestales, incluyendo suelos erosionados con potencial de uso agrícola inmediato.	15
Césped, jardines y áreas verdes.	2
Suelos degradados sin potencial de uso agrícola inmediato (recuperación de cárcavas para generar capa vegetal o para estabilizar estructuras riesgosas).	30

3.2 Restricciones

La siguiente tabla muestra las restricciones correspondientes a cada tipo de lodo.

Tabla 5 Restricciones para la aplicación de lodos según su tipo

Lodo	Restricción
Clase A	<ul style="list-style-type: none">• Sin restricciones por razones sanitarias
Clase B	<ul style="list-style-type: none">• Prohibida su aplicación a menos de 300 m de áreas residenciales, hospitales, etc.• Prohibida su aplicación a menos de 100 m de una vivienda aislada.• En suelos destinados a cultivos hortícolas o frutícolas menores, que estén en contacto directo con el suelo y que se consuman normalmente sin proceso de cocción, los lodos deberán aplicarse a lo menos 12 meses antes de la siembra.• No se podrá aplicar lodos en cultivos hortícolas ni frutícolas menores durante el período de crecimiento.• En praderas y cultivos forrajeros, podrá procederse al pastoreo o a la cosecha sólo transcurrido 30 días desde la última aplicación.• En suelos de uso forestal, la aplicación de lodos podrá efectuarse sólo si se cuenta con un control de acceso durante los 30 días posteriores de la aplicación.

II. MANEJO SANITARIO DE LOS LODOS

Transporte de lodos

- Los lodos que no cumplan con los criterios para lodos Clase B, así como los lodos que presenten contenidos de humedad superior a 70%, deberán transportarse en contenedores herméticos.
- Los lodos deshidratados que cumplan con los criterios para lodos Clase B, podrán transportarse en recipientes cubiertos en condiciones que impidan el escurrimiento, el derrame o la emisión del material particulado durante el mismo.

Disposición final en un mono - relleno

- Las instalaciones de tratamiento deberán evitar la infiltración de los líquidos hacia las aguas subterráneas y el escurrimiento de aguas contaminadas hacia cursos o masas de aguas superficiales.
- Se deberá cumplir al menos con una de las condiciones relativas a la reducción de atracción de vectores mencionadas anteriormente.

- La disposición de lodos provenientes de fosas sépticas en un mono - relleno, deberá cumplir una de las siguientes condiciones relativas a la reducción de atracción de vectores: Inyección de lodos, Incorporación de lodos en el suelo, Recubrimiento de lodos o Tratamiento alcalino para lodos domésticos provenientes de fosas sépticas.
- La instalación debe contar con autorización de la autoridad competente.

Disposición final en un relleno sanitario

La autoridad competente podrá autorizar la co-disposición en un relleno sanitario de lodos no peligrosos en cantidades que no superen el 6% por peso base húmeda del total de residuos depositados, cuando ello no entorpezca la operación normal del relleno.

Requisitos:

- Reducción de atracción de vectores, de acuerdo a lo señalado anteriormente.
- Tratamiento de higienización que asegure la eliminación significativa de patógenos.
- Presentar un contenido de humedad no superior a un 70%.

Disposición final en minas subterráneas, zonas de extracción de áridos y canteras

Se debe cumplir con los requisitos señalados para mono - rellenos.

Vertimiento en aguas

- El reglamento prohíbe el vertimiento de lodos al mar.
- Los lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable se podrán disponer en cursos de aguas superficiales si cumplen con las concentraciones máximas de metales pesados señaladas a continuación:

Tabla 6 Concentraciones máximas de metales pesados en lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable que se podrán disponer en cursos de agua

Metal Pesado	Concentración máxima en mg/kg. de lodo (base seca)¹
Arsénico	40
Cadmio	40
Cobre	1.500
Mercurio	20
Níquel	420
Plomo	400
Selenio	100
Zinc	2.800

¹ Concentraciones expresadas como contenidos totales

III. PERMISOS, DOCUMENTACION E INFORMES

- Todo generador de lodos no peligrosos deberá presentar para su aprobación ante la autoridad competente un Plan de Manejo de Lodos No Peligrosos que contemple a lo menos lo siguiente:
 - Descripción de los procesos que generan lodos
 - Cantidades de lodos generados
 - Proyecto de diseño de las unidades de tratamiento de lodos
 - Características de los lodos tratados
 - Destino final de los lodos.
- El generador de lodos deberá emitir una Guía de Despacho, la que debe acompañar el transporte, recepcionándola el destinatario.
- Las plantas de aguas servidas domésticas o de aguas residuales de características similares con capacidad inferior a 2.500 habitantes equivalentes o que generen hasta 100 kg. lodo (base seca) podrán ser liberadas por la autoridad competente de las obligaciones señaladas con anterioridad.
- Todo generador de Lodos Clase A ó B deberá contar con autorización de la autoridad competente para su comercialización. Asimismo, todo usuario de lodos deberá contar con autorización de la autoridad competente.

- Los lodos que se entreguen a un usuario deberán ir acompañados de un Formulario Único y una Ficha Técnica.

El formulario único deberá contener a lo menos la siguiente información:

- Clasificación del lodo (A ó B);
- Peso total (expresado en kg.);
- Tipo de tratamiento de los lodos;
- Contenido de Carbón Orgánico Total (expresado como materia orgánica);
- Contenido de sólidos (expresados como porcentaje);
- Conductividad eléctrica;
- pH;
- Contenido de nitrógeno, fósforo y potasio disponible y de nitrógeno y fósforo total (expresados como mg/kg.);
- Contenido total de los metales pesados señalados (expresados como mg/kg. en base seca) y
- Resultados de los análisis ecotoxicológicos.

La ficha técnica de los lodos deberá contener a lo menos la siguiente información:

- Una advertencia de que el lodo en caso de no ser aplicado en forma apropiada, puede afectar en forma negativa la fertilidad del suelo, la calidad de las aguas y del aire o los cultivos;
- Las prohibiciones o restricciones de uso
- La tasa máxima de aplicación del lodo (expresada como kg./há.año);
- Forma de aplicación de los lodos al suelo (superficial, incorporación, inyección u otra).

El generador de lodos deberá mantener un registro, en el cual conste lo siguiente:

- Cantidades de lodos generados y entregados a los agricultores (en toneladas, base seca);
- Formulario Único
- Nombre y dirección de los usuarios de los lodos;
- Identificación de los predios de aplicación;
- Contenido inicial y seguimiento de la acumulación de cada uno de los metales pesados señalados, en los suelos de los predios de aplicación.

Este registro deberá ser entregado a la autoridad competente, cuando ésta lo solicite.

IV. PLAZO PARA EL CUMPLIMIENTO DE LAS REGULACIONES

A continuación, se indican los plazos establecidos por el reglamento para cumplir con las regulaciones:

Tabla 7 Plazos para cumplir las regulaciones

Instalación	Plazo
Existente (anterior a la entrada en vigencia del Reglamento)	<ul style="list-style-type: none">• 1 año para aprobar ante el Servicio de Salud un Plan de Manejo de lodos.• 5 años para cumplir con exigencias establecidas en el Reglamento.
Nueva (posterior a la entrada en vigencia del reglamento)	<ul style="list-style-type: none">• 1 año para cumplir con exigencias establecidas en el Reglamento, a partir de su puesta en marcha.

V. PROCEDIMIENTOS DE MUESTREO, MEDICION Y ANALISIS

- Previo a la entrega al destinatario, los lodos serán objeto de muestreo el cual deberá ser representativo de los mismos.

Tabla 8 Análisis requeridos de acuerdo al destino del lodo

Destino del lodo	Análisis
Disposición final	<ul style="list-style-type: none">• Densidad de coliformes fecales• Contenido de humedad
Aplicación en agricultura	<ul style="list-style-type: none">• Contenido de carbono orgánico total• Contenido de sólidos• Conductividad eléctrica• pH• Contenido de nitrógeno, fósforo y potasio disponible y de nitrógeno y fósforo total.• Contenido de metales pesados• Análisis ecotoxicológicos

- La frecuencia de los análisis que se deben efectuar a los lodos con destino a la aplicación agrícola será señalada a continuación:

Tabla 9 Frecuencia de análisis de acuerdo a la producción de lodos

Cantidad de lodos, en ton/año	Frecuencia de análisis
0 – 300	1 vez al año
300 – 1.500	4 veces al año
1.500 – 15.000	6 veces al año
Mayor a 15.000	12 veces al año

Nota: En caso que los resultados de los análisis no varíen de forma significativa en un período de dos años, la autoridad competente podrá autorizar una frecuencia menor, que a lo menos será anual.

- Antes de la primera aplicación de lodos, deberán efectuarse análisis de los suelos con respecto a: pH, contenido de nitrógeno, fósforo y potasio disponible y contenido total de los metales.

VI. FISCALIZACION

En el siguiente cuadro se presentan los organismos que tienen la facultad de fiscalizar el cumplimiento de lo dispuesto en el reglamento.

Tabla 10 Autoridades competentes para realizar fiscalización

Autoridad	Competencia
Servicio de Salud	Aprobación de Planes de Manejo de Lodos no Peligrosos y liberación de pequeños generadores Autorización de Generador lodos Clase A y B Autorización de Usuario lodos Clase B Autorización de uso de lodos no peligrosos para parques y jardines Fiscalización registro Generador
Servicio Agrícola y Ganadero	Autorización de uso de lodos no peligrosos para suelos agrícolas Autorización de Generador lodos Clase A y B Autorización de Usuario lodos Clase B Fiscalización de registro Usuario
Corporación Nacional Forestal	Autorización de uso de lodos no peligrosos para suelos forestales Autorización de Usuario lodos Clase B Fiscalización de registro Usuario
Dirección General de Territorio Marítimo y de Marina Mercante	Autorización para disposición de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de agua potable en lagos y ríos navegables por buques de más de 100 toneladas y en aguas marinas
Superintendencia de Servicios Sanitarios	Autorización para disposición de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de agua potable en otros cursos de aguas superficiales.

NORMATIVA INTERNACIONAL

Es importante mencionar que la normativa extranjera se refiere exclusivamente a lodos de tratamiento de aguas servidas domiciliarias o con características similares; las exigencias relativas al manejo de lodos provenientes del tratamiento de agua potable y RILes forman parte de la normativa de manejo de residuos sólidos y/o residuos líquidos.

A. Contenido máximo de elementos traza aceptados en lodos de uso agrícola

- Normativa E.P.A

Elemento	Límite máximo permisible (mg/kg lodo seco)	Carga máxima permisible (kg./há)	Concentración de calidad excepcional (mg/Kg. de lodo seco)	Tasa máxima anual de aplicación (Kg./há/año)
Arsénico	75	41	41	2,0
Cadmio	85	39	39	1,9
Cobre	4.300	1.500	1.500	150
Mercurio	57	17	17	75
Níquel	420	420	420	15
Plomo	840	300	300	0,85
Selenio	100	100	36	0,90
Zinc	7.500	2.800	2.800	21
Molibdeno	75	18	18	5,0
Cromo	3.000	3.000	1.200	140

Nota: concentraciones expresadas como contenidos totales.

- Normativa Alemana (1992)

Elemento	Concentración máxima (mg/Kg de lodo base seca)	Carga máxima de metales (Kg./há./año)
Arsénico	-	-
Cadmio	10 (5)	1,5 (1)
Cobre	800	60
Cromo	900	100
Mercurio	8	1
Molibdeno	-	-
Níquel	200	50
Plomo	900	100
Selenio	-	-
zinc	2.500 (2.000)	200

* Valores en paréntesis = concentraciones máximas en suelos ácidos (pH entre 5 y 6)

- Normativa Suiza (1986)

Elemento	Valor límite (mg/Kg. de lodo base seca)
Plomo	500
Cadmio	5
Cromo	500
Cobalto	60
Cobre	600
Molibdeno	20
Níquel	80
Mercurio	5
Zinc	2.000

- Normativa Europea

Elemento	Concentración máxima (mg/Kg. lodo base seca)	Carga máxima de aplicación (Kg./há/año)
Cadmio	40	0,15
Cobre	1.750	12 **
Cromo *	-	-
Mercurio	25	0,1
Níquel	400	3
Plomo	1.200	15
Zinc	4.000	30 **

Nota: Para una muestra representativa de los suelos cuyo pH sea de 6 a 7.

* Actualmente, no se puede establecer un límite máximo permisible para el cromo.

** Los estados miembros podrán autorizar que se sobrepasen los valores límite para dichos parámetros en suelos cuyo pH sea constantemente superior a 7. En ningún caso las concentraciones máximas autorizadas de dichos metales deberán sobrepasar en más de un 50% los valores arriba citados.

- Normativa Francesa

Elemento	Concentración máxima en el lodo (mg/Kg. base seca)	Carga máxima de aplicación (Kg./há/año, base seca)
Cadmio	40	0,06
Cobre	2.000	3
Cromo	2.000	3
Mercurio	20	0,03
Níquel	400	0,6
Plomo	1.600	2,4
Selenio	200	0,3
Zinc	200	0,3
Cromo + cobre + níquel + zinc	8.000	12

- Normativa Española (1995)

Elemento	lodos con pH < 7 (mg/Kg., base seca)	lodos con pH > 7 (mg/Kg., base seca)	Valor límite (Kg./há./año)
Cadmio	20	40	0,15
Cobre	1.000	1.750	12
Níquel	300	400	3
Plomo	750	1.200	15
Zinc	2.500	4.000	30
Mercurio	16	25	0,1
Cromo	1.000	1.500	3

B. Concentraciones máximas de microcontaminantes en el suelo, a partir de las cuales se prohíbe el uso agrario de lodos

Elemento	Cantidad máxima Normativa Española		Cantidad máxima normativa Europea	Cantidad máxima normativa Alemana		Cantidad máxima normativa Francesa	Cantidad máxima normativa E.P.A
	Suelo pH<7	Suelo pH>7		Suelos con pH=5-6	Otros suelos		
Arsénico	-	-	-	-	-	-	9
Cadmio	1	3	3	1	1,5	2	7
Cobre	50	210	140	60	60	100	-
Mercurio	1	1,5	1,5	1	1	1	5
Níquel	30	112	75	50	50	50	850
Plomo	50	300	300	100	100	100	150
Selenio	-	-	-	-	-	10	140
Zinc	150	450	300	150	200	300	-
Molibdeno	-	-	-	-	-	-	-
Cromo	100	150	-	100	100	150	3.200

Cantidades máximas aceptadas en mg/Kg. de suelo en base seca.

C. Requisitos microbiológicos para lodos Clase A y Clase B, E.P.A (1992)

Lodos Clase A

Microorganismo	Requisitos
Coliformes fecales	< 1.000 NMP/g de lodo (base seca)
Salmonella sp.	< 3 NMP/4g de lodo (base seca)
Virus entéricos	< 1huevo/4g de lodo (base seca)
Huevos de helmintos	< 1 UFP/4g de lodo (base seca)

Lodos Clase B

Se exige una disminución de parásitos y virus entéricos en forma adecuada, lo que se traduce en una densidad de Coliformes fecales en el lodo tratado de $2e^6$ ufc/g de sólido seco. No es necesario reducir los huevos de helminto.

Tiempos de restricción de uso de lodos **Clase B** para distintas aplicaciones:

- Los alimentos con partes que tocan la mezcla de lodos de alcantarilla y suelo, y están totalmente sobre la superficie del terreno, no serán cosechados por 14 meses después de la aplicación de los lodos.
- Los alimentos con partes bajo la superficie de la tierra no serán cosechados antes de 38 meses después de la aplicación de los lodos de alcantarilla; ello cuando el lodo permanece en la superficie de la tierra por menos de 4 meses antes de incorporarlo al terreno.
- Los alimentos con partes bajo la superficie de la tierra no serán cosechados antes de 20 meses después de la aplicación de los lodos de alcantarilla, cuando el lodo permanece en la superficie 4 meses o más antes de incorporarlos al terreno.
- Los alimentos para animales y fibras no serán cosechados hasta 30 días después de la aplicación de los lodos (ejemplo heno).
- No se permitirá que animales pasten en el terreno hasta 30 días después de la aplicación de los lodos.
- Los pastos en que se aplicó lodos de alcantarilla no serán cosechados hasta un año después de la aplicación del lodo; esto si el pasto cosechado se localizará en terrenos con un alto potencial para exposición del público (por ejemplo césped), a menos que la autoridad pertinente lo autorice expresamente.
- El acceso de público a terrenos con un alto potencial de exposición pública será restringido hasta 1 año después de la aplicación de los lodos.
- El acceso de público a terrenos con un bajo potencial de exposición pública será restringido por 30 días después de la aplicación de los lodos.

D. Requisitos que debe tener un compost de calidad según la Organización Mundial de la Salud (O.M.S, 1985)

- La Organización Mundial de la Salud ha establecido los rangos tolerables de metales pesados que puede contener el compost maduro o final.

Metales pesados	Rangos normales (mg/Kg. de materia seca)
Boro	60 - 360
Cadmio	15 - 40
Cobre	90 - 260
Hierro	8.000 - 15.000
Mercurio	1 - 5
Manganeso	300 - 1.300
Molibdeno	10
Plomo	200 - 400
Zinc	800 - 1.200

- Propiedades generales de un compost para ser comercializado:

Propiedades	Rango normal
Contenido de humedad (%)	30 - 50
Materia inerte (%)	30 - 70
Contenido orgánico (%)	10 - 30
pH	6 - 9
Tamaño máx. de partículas (mm)	2 - 10

- Rangos tolerables de elementos químicos que puede contener el compost maduro o final:

Elementos mayores	Rangos normales (mg/Kg. de materia seca)
Nitrógeno	0.1 - 1.8
Fósforo	0.1 - 1.7
Potasio	0.1 - 2.3
Sulfuro	0.5 - 3.0
Alcalinidad	-
Sales totales	-

E. Concentraciones máximas permisibles en lixiviados provenientes de depósitos de lodos (sin impermeabilización)

Distancia al límite de la propiedad (m)	Concentraciones de contaminantes (mg/Kg, base seca)		
	As	Cr	Ni
0 - 25	30	200	210
25 - 50	34	220	240
50 - 75	39	260	270
75 - 100	46	300	320
100 - 125	53	360	390
125 - 150	62	450	420
Sobre 150	73	600	420

Fuente: USEPA. 1993.

Anexo 2

TÉCNICAS DE COMPOSTAJE

A. Compostaje en pilas estáticas

Es el sistema más antiguo de compostaje y el menos complejo. En éste se forman pilas de reducida altura, que se dejan sin movimiento, ventilándose naturalmente (por movimiento convectivo de aire y difusión), por lo tanto, ocurren procesos de anaerobiosis zonales, con generación de malos olores, gases y líquidos. Lo anterior, genera una fermentación deficiente e irregular, obteniendo un producto de baja calidad. El tiempo de estabilización de la pila está entre 4 y 6 meses. En regiones con mucha pluviometría o alta humedad ambiental, se recomienda colocar el material bajo techo o galpones.

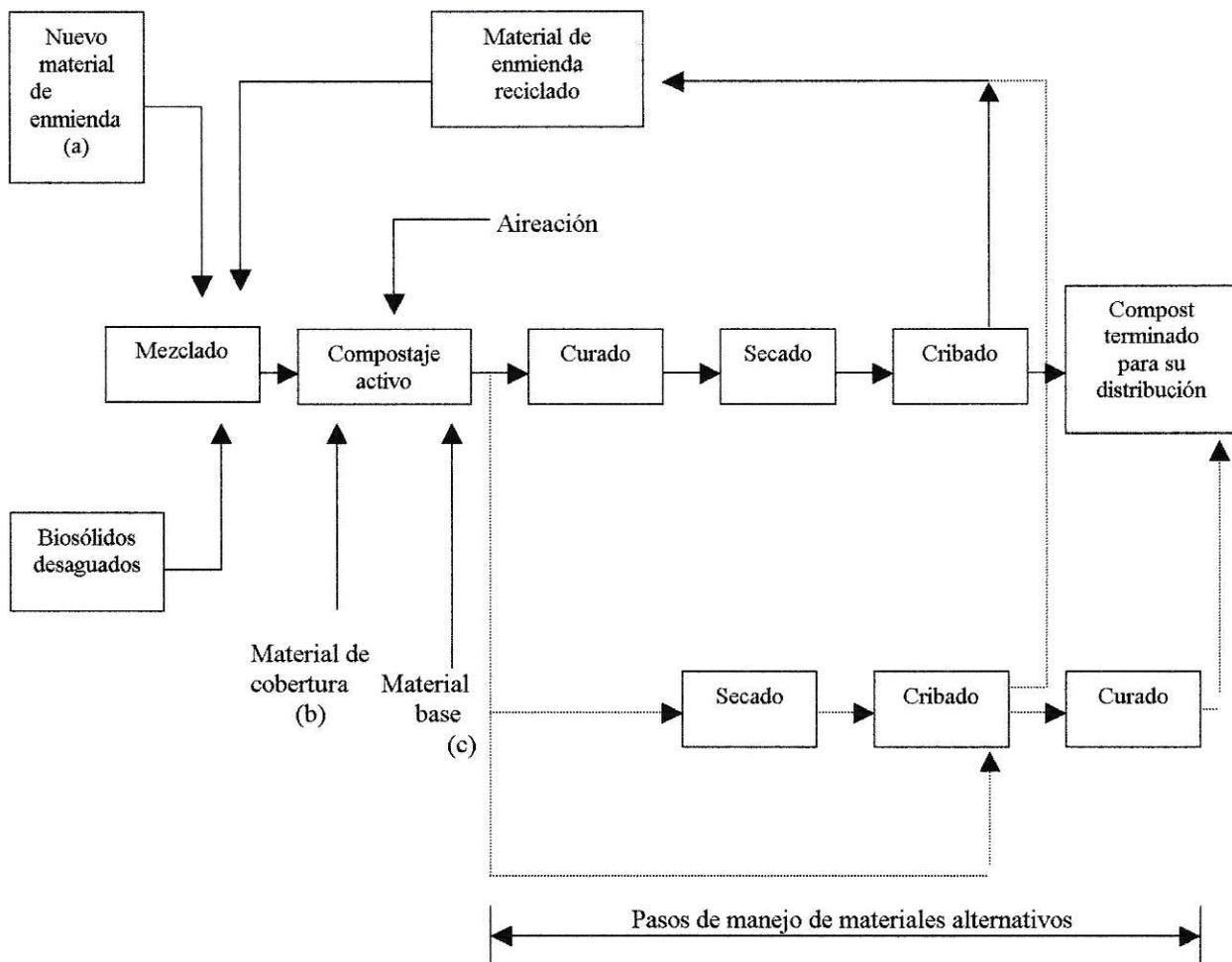
B. Compostaje en pilas estáticas aireadas

El sistema de pila estática aireada consiste en una red de tuberías de escape o aireación sobre la cual se coloca la fracción orgánica procesada. Las alturas de las pilas son aproximadamente de 2 a 2,5 m. A menudo se coloca encima de la pila recientemente formada una capa de compost cribado para el control de olores.

Cuando se van a fermentar los lodos deshidratados de aguas residuales procedentes de plantas de tratamiento, se precisa un dispositivo que esponje el lodo para mantener la adecuada porosidad del residuo en el compostaje, los que además sirven para absorber la humedad en exceso.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo general del proceso. Los lodos desaguados requieren la adición de un mejorador o material de enmienda para agregar porosidad y estructura, aumentando el contenido de sólidos de la mezcla antes del compostaje. El material de enmienda puede también agregar carbono al proceso para mejorar la relación carbono/nitrógeno (C:N) de la mezcla, suministrando energía adicional a los microorganismos durante el compostaje.

Figura: Diagrama de flujo del proceso de compostaje en pila estática aireada (a = por lo general astillas de madera, desechos de madera, desechos desmenuzados de restos vegetales (maleza, hojas, restos de planta), desechos sólidos desmenuzados u hojas; b = por lo general compost cribado o no cribado; y c = por lo general material de enmienda nuevo o reciclado).



El material de enmienda más comúnmente usado en instalaciones de compostaje en pila estática aireada son las astillas de madera debido al nivel de disponibilidad en la mayoría de las regiones y la capacidad de desempeñar las funciones deseadas de un material de enmienda. Por lo general, un material de enmienda fresco y un material de enmienda reciclado se agregan a los lodos y son mezclados a fondo usando mezcladores estacionarios o móviles antes del compostaje. Los cargadores frontales, cajones de mezcla y molinos de arcilla se usan en sistemas de pila estática para el mezclado.

Después del mezclado, el material se ubica sobre una cámara de aireación consistente en una red de tuberías o zanjas conectadas a los sopladores de aireación. Por lo general, una base porosa de astillas de madera u otro material adecuado se ubica sobre la tubería de aireación. Posteriormente, se amontona la mezcla de biosólidos y material de enmienda sobre esta base y frecuentemente una capa aislante de compost terminado se usa para cubrir la pila. La aireación se suministra forzando aire a través de la tubería y cámara de aireación, y dirigido hacia arriba a través de la pila de compostaje (modo positivo), o por arrastre de aire descendente a través de la pila de compostaje en la cámara y tubería de aireación donde sale el soplador (modo negativo).

El compostaje en pila estática aireada se practica por lo general por 14 a 28 días, siendo 21 días el período de tiempo más comúnmente usado.

Configuraciones de Pila Individual versus Pila Extendida

En las siguientes figuras se muestran ejemplos de pilas de compostaje individual y extendida respectivamente. Las pilas de compostaje individual se usan en instalaciones donde es importante mantener los lotes de lodos totalmente separados en base a día a día, o en instalaciones donde un volumen consistente de lodos se genera en base a día a día.

Figura: Típica configuración de pila individual de compostaje estática aireada

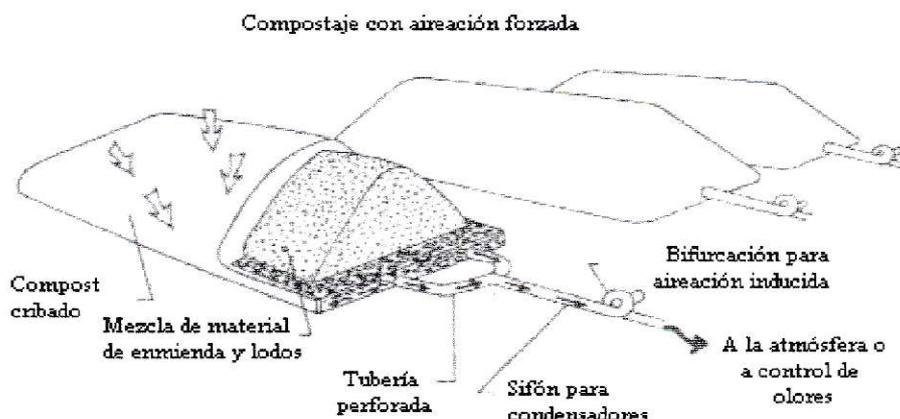
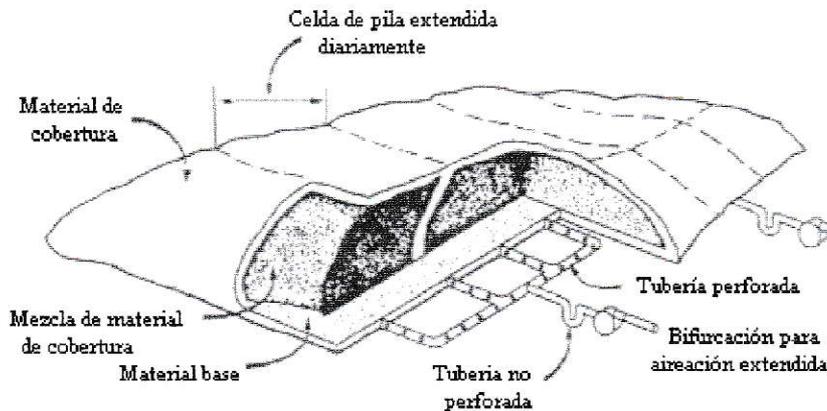


Figura: Típica configuración de pila extendida de compostaje estática aireada



La configuración de pila extendida ofrece varias ventajas sobre una configuración de pila individual, incluyendo lo siguiente:

- La ubicación de la tubería de aireación es más uniforme desde una pila a la próxima.
- Una pila extendida requiere menos espacio de suelo para el mismo volumen de biosólidos.
- Menor cantidad de problemas de cortocircuitos de aireación en pilas extendidas.
- Debido a que el flujo de aire es más uniforme, ocurren temperaturas más uniformes a través de la pila.
- Se produce una menor manipulación de materiales en el proceso de compostaje completo y se requiere una menor cobertura y base de la pila debido a la configuración de una pila extendida.

Sin embargo, la construcción de una pila individual tiene la ventaja de que los lotes de mezclas de lodos pueden mantenerse totalmente separados, lo cual puede ser beneficioso en las instalaciones con variaciones en la calidad de los lodos. La construcción de pila individual se usa en pequeñas instalaciones donde las pilas de compost se construyen no más de una vez por semana.

Este tipo de compostaje requiere una serie de equipamiento: un compresor, red de tuberías, válvulas, y sistemas de control de presión de aire, temperatura y humedad, lo que lo hace tener un costo mayor.

C. Compostaje en reactor

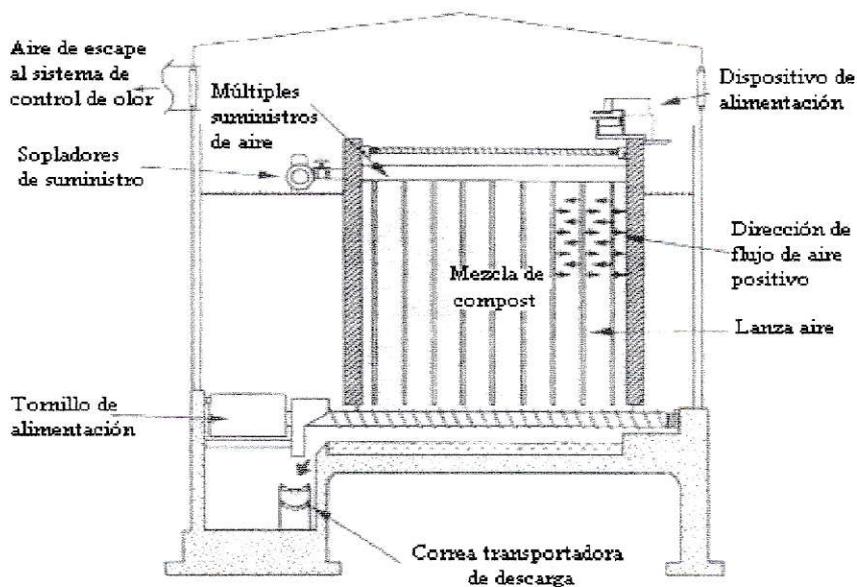
Los sistemas en estanques ofrecen un producto potencialmente más estable y consistente que las operaciones de compostaje en pila estática, pila estática aireada y pilas de volteo, con menores requerimientos de espacio y mejor contención y control de olores. Sin embargo, los sistemas en estanque no siempre cumplen con las promesas iniciales, ya que éstos son más intensivos mecánicamente y requieren mayor mano de obra para la mantención.

El compostaje en estanque es por lo general un proceso multietapa. La primera etapa se lleva a cabo en un reactor, algunas veces llamado “bioreactor”. El tiempo de detención en el reactor varía de 10 a 21 días dependiendo de las recomendaciones del proveedor del sistema, requerimientos regulatorios y costos. Hay tres clases generales de reactores: reactores de flujo pistón vertical, reactores de flujo pistón horizontal y reactores de lecho agitado.

Sistemas de Flujo Pistón Vertical

Los sistemas de flujo pistón vertical consisten en silos verticales en los cuales el material se alimenta por el tope y se retira por el fondo. El material de enmienda es por lo general una mezcla de aserrín y compost reciclado, y no se criba afuera. El aire es forzado a través del lecho. Por lo general, el curado toma lugar en una unidad de segunda etapa, con un tiempo de retención total que varía desde los 28 a los 35 días.

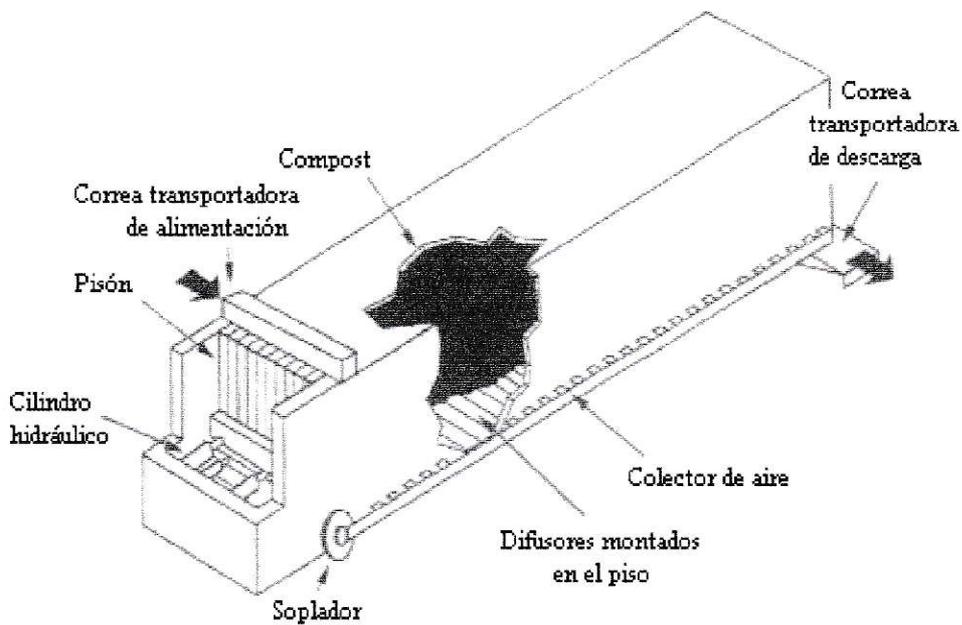
Figura: Reactor de flujo pistón vertical cilíndrico de acero (no a escala)



Sistemas de Flujo Pistón Horizontal

El segundo tipo de reactor es el reactor de flujo pistón horizontal, también conocido como el reactor "túnel" debido a su forma. La operación es similar al sistema de flujo pistón vertical con la excepción que el material se alimenta por un extremo del reactor usando un dispositivo tipo pistón y se descarga al otro extremo. En las siguientes figuras se muestra un reactor de flujo pistón horizontal y un reactor de mezclado horizontal.

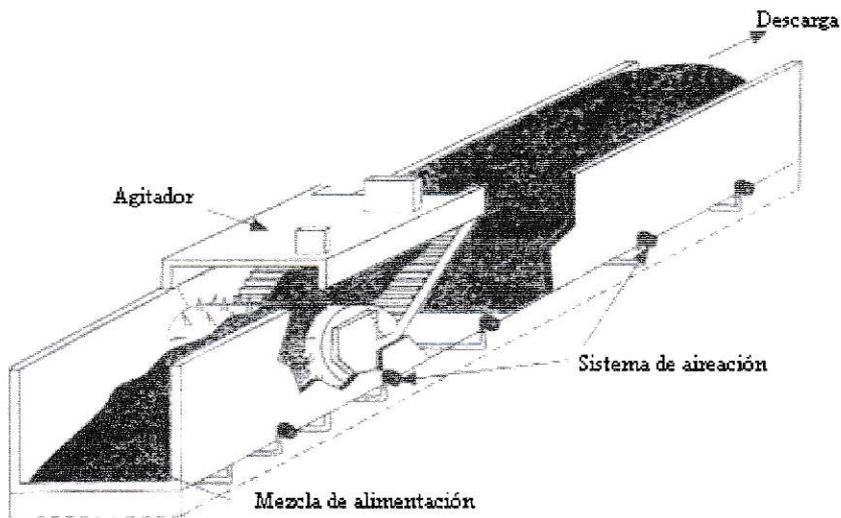
Figura: Reactor de flujo pistón horizontal (no a escala)



Reactores de lecho agitado

Los reactores de lecho difieren de los reactores de flujo pistón en que el compost no se mueve como una masa sin mezclar a través del reactor. En vez de eso, los dispositivos mecánicos agitan periódicamente los materiales que se están compostando. Físicamente, los reactores son lechos abiertos – cubiertos, con suministros de aire desde el fondo y pueden ser rectangulares o circulares. La profundidad del lecho de compost es por lo general de 2 a 3 m. En la figura siguiente se muestra un esquema de un típico reactor de lecho agitado.

Figura: Reactor de lecho agitado



Ventajas y desventajas del sistema

La ventaja de cada tipo de sistema en estanque depende de los materiales que serán compostados y de las condiciones del lugar. Los sistemas de flujo pistón son relativamente compactos y proveen la mejor oportunidad para la contención de olores debido a que los lechos pueden ser totalmente encerrados y mantenidos a presión negativa. Los sistemas de lecho agitado, sin embargo, ofrecen mayor flexibilidad en el control del proceso y la oportunidad de usar una variedad de materiales de enmienda. Además, sus sistemas mecánicos son más accesibles para servicio.

FACTORES CRÍTICOS EN LA PRODUCCIÓN DE COMPOST

Debido a que el compostaje es un proceso de conversión microbiológica de materia prima orgánica (residuos orgánicos) en humus estable, donde se requiere de condiciones óptimas para el crecimiento y desarrollo de los microorganismos, se hace indispensable que exista un manejo adecuado de los “factores críticos” del proceso.

Los factores críticos corresponden a:

- Temperatura
- pH
- Humedad
- Relación Carbono/Nitrógeno
- Aireación
- Granulometría
- Tiempo
- Período de estabilización

A. Definición y procedimientos de control

- Temperatura

Esta tiene efecto en el crecimiento y la actividad metabólica de los microorganismos. Es un parámetro útil para medir el proceso de descomposición, ya que en la medida que se desarrolla el metabolismo de las bacterias se genera calor; por lo tanto, el incremento de temperatura es un buen indicador de cómo está funcionando el proceso.

La velocidad del proceso se acelera cuando la temperatura está entre los 35 y 70°C. Sobre esta temperatura los microorganismos mueren y podrían generarse olores desagradables en la medida que la pila se esteriliza a sí misma, por lo tanto, en estas condiciones es indispensable voltear. Estas temperaturas mantenidas en el tiempo permiten ejercer naturalmente un tratamiento de sanitización especialmente con respecto a microorganismos patógenos, así como también logran destruir semillas de malezas, esporas de hongos y algunas fitotoxinas que posteriormente significarían un problema al adicionar el compost sobre cultivos agrícolas.

Si una pila de compostaje no logra subir su temperatura por sobre los 48°C pasados algunos días, está indicando que probablemente no hay suficiente nitrógeno en la pila para activar o gatillar el proceso.

- pH

Este es un parámetro importante para evaluar el ambiente microbiano y la estabilización de los residuos. El valor del pH, al igual que la temperatura varían con el tiempo y el proceso de compostaje. El pH inicial está normalmente entre 5 y 7.

En los primeros días de compostaje, el pH cae a 5 o menos, debido a la presencia de ácidos orgánicos simples, y la temperatura sube debido a la actividad de organismos mesófilos. Después de aproximadamente 3 días, la temperatura llega a la etapa termofílica y el pH comienza a subir hasta aproximadamente 8 – 8.5 para el resto del proceso aeróbico. El valor del pH llega a un valor de 7 a 8 en el compost maduro.

- Humedad

Ejerce un efecto importante en la población bacteriana en cuanto a su crecimiento y actividad metabólica, este factor debe ser expresamente manejado cuando se trata de fabricar compost de modo eficiente (acortando los tiempos del proceso). El valor ideal varía entre 40 – 60%.

Se debe tener en cuenta que *la frecuencia del volteo está condicionada exclusivamente por las fluctuaciones de temperatura y el porcentaje de humedad del material.*

Para una evaluación rápida del contenido de humedad se debe tomar una porción en la mano, el material se debe sentir esponjoso, suave y apenas botar una gota de agua si se estruja.

- Relación Carbono/Nitrógeno

Este es otro parámetro de producción muy importante a la hora de dar las condiciones óptimas para que se inicie el desarrollo de los microorganismos, esta relación puede variar entre un sustrato y otro pero como rango se ha determinado que una relación 15:1 a 30:1 es la más adecuada.

Las bacterias y microorganismos encargados de la descomposición aeróbica requieren de una mayor presencia de carbono que de nitrógeno para crear un ambiente óptimo para su crecimiento y desarrollo. Esta actividad genera calor, y mientras más caliente esté la pila mayor es la tasa de descomposición de ésta. Mientras más cercana sea la tasa C/N a 30, más caliente se vuelve la pila (Manual de compostaje. INTEC CHILE).

En la siguiente tabla se pueden observar las temperaturas alcanzadas por pilas de compostaje con distintas relaciones C/N.

Tabla: Influencia de la relación C/N sobre la temperatura.

Relación Carbono/Nitrógeno	Máxima temperatura alcanzada por la pila de compost
30/1	68°C
40/1	60°C
60/1	40°C

Cabe hacer notar que relaciones de C/N muy distintas a las presentadas derivan en una notable disminución o anulación (en algunos casos) de la actividad microbiana.

- Aireación

Este factor es el cuarto más importante, ya que si la pila o cúmulo en donde se encuentran las materias primas del compost deja de tener aireación el proceso de fermentación cambia de aeróbico a anaeróbico generándose productos distintos, con manejo diferente y graves problemas de olor.

También se producen malos olores, al agregar materiales cuya descomposición ocurre en un tiempo relativamente largo. Para evitar y minimizar los problemas potenciales de olores, es importante reducir el tamaño de las partículas, separar plásticos y otros materiales no biodegradables en el origen.

El oxígeno se mueve dentro de la pila principalmente por difusión, así si la pila es muy grande se dificulta el paso de oxígeno al centro de la misma, es por eso que en grandes instalaciones o en pilas muy grandes se recomienda hacer aireación forzada.

- Granulometría (tamaño de las partículas)

La mayoría de los materiales que conforman los residuos sólidos son de variada forma y tamaño. Se puede reducir esta irregularidad mediante la trituración de los materiales orgánicos, ayudando con ello a incrementar las superficies de contacto para los microorganismos.

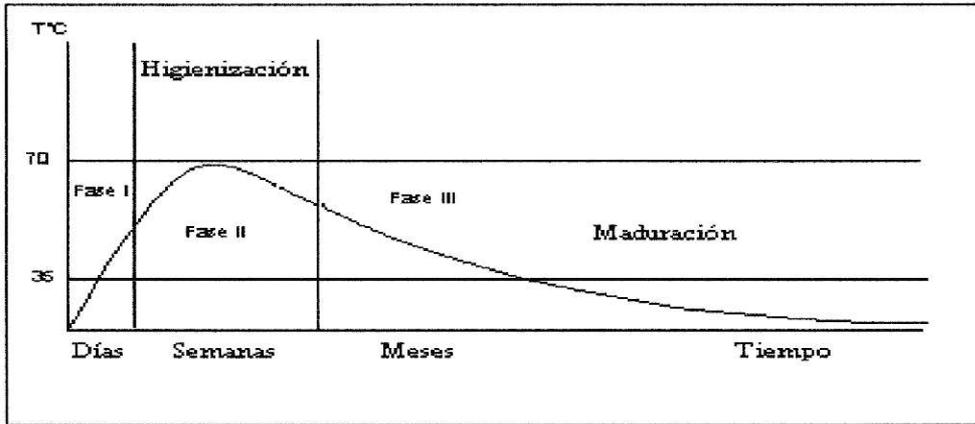
El tamaño de partículas deseable para el compostaje es entre 2 a 5 cm, se pueden procesar partículas más grandes, pero con esto se aumenta el tiempo de compostaje.

- Tiempo

Mientras mayor es el tiempo de permanencia de los materiales a compostar dentro de la pila más seguridad se tendrá de la completa degradación y madurez del compost.

El compost debe pasar 3 fases para estar maduro. Las Fases I, II y III se pueden observar en la siguiente figura:

Figura: Fases del compost en el tiempo



Fase 1:

La fase inicial dura alrededor de 1 a 7 días, aquí se ha iniciado la actividad degradativa por hongos y bacterias mesófilas sobre materia orgánica fácilmente degradable tal como azúcares, almidón y proteínas.

Fase 2:

Fase termofílica en la que ocurre la digestión de la celulosa y hemicelulosa.

Fase 3:

Fase de estabilización en la que disminuye la temperatura conjuntamente con la tasa de descomposición microbiana.

La destrucción de organismos patógenos es un elemento importante de diseño en el proceso de compostaje. La tasa de mortalidad de los patógenos está en función del tiempo y de la temperatura, la mayoría de los patógenos serán destruidos rápidamente cuando todas las partes de la pila estén sometidas a una temperatura de aproximadamente 55°C. Solamente unos pocos pueden sobrevivir a temperaturas de hasta 67°C durante un corto período de tiempo. Se pueden eliminar todos los patógenos existentes dejando el material que está fermentándose a una temperatura de 70°C durante 2 horas.

- Período de estabilización del material

El proceso es variable y depende del material a utilizar, se puede reconocer el producto terminado cuando la temperatura del material baja a aproximadamente 25°C y se mantiene sin subir por lo menos una semana.

Un criterio simple para saber si el producto se encuentra estabilizado es colocar un poco del material dentro de una bolsa plástica cerrada, y esperar 24 horas, esperando no encontrar emanación de malos olores, humedad ni aumentos de temperatura.

Una vez que se encuentra estabilizado el material, se debe dejar reposar o madurar, entre 15 a 45 días, para posibilitar la higienización del compost, al terminar de degradarse todos los restos de material orgánico.

Anexo 3

MÉTODOS DE RELLENO

La caracterización de los lodos permite seleccionar los métodos de relleno que son más compatibles con el lodo a disponer. Básicamente, las características del lodo más importantes para la elección del método son la humedad y la estabilidad que presenta al momento de disponerlo en el relleno.

A. Relleno de área

En este caso, el lodo se ubica sobre la superficie por lo que no se necesita excavar. Estas aplicaciones son especialmente útiles en áreas que tienen agua subterránea y lechos de rocas no muy profundos.

No es necesario que el contenido de sólidos esté limitado, pero debido a que no hay contención de la pared lateral (que existe en la zanja) y a que la maquinaria debe ubicarse sobre el lodo, su estabilidad y capacidad de soporte deben ser buenas. Para conseguirlo, es usual que el lodo se mezcle con tierra proveniente de otras áreas para lograr hincharlo. Como este relleno se hace en la superficie del suelo, se pueden instalar capas con más facilidad que en las zanjas. De todas formas es de esperar que exista movimiento del agua que contiene el lodo, por lo que se debe pensar en instalaciones adecuadas para controlar el drenaje de superficie.

El área de relleno consiste en varias cargas consecutivas o aplicaciones de la mezcla lodo/sólido y el suelo de cubierta. Como en cualquier tipo de relleno, la cubierta debe aplicarse encima de todo el lodo, sin embargo es necesario aplicarla antes para dar estabilidad a cargas adicionales.

Capa de relleno de área

En este relleno, el lodo que se recibe puede tener como mínimo un contenido de sólidos del 15%. Se mezcla con tierra para hincharlo y producir un material que sea más estable y posea mayor capacidad de soporte, las proporciones típicas son de 0,25 a 1 parte de suelo por cada parte de lodo. En cuanto a los rellenos, la proporción depende del contenido de sólidos del lodo, la necesidad de estabilidad de la capa y la capacidad de soporte, según la cantidad de capas y el peso del equipo.

La mezcla se esparce formando capas uniformes con un grosor de 0,15 a 0,19 metros. La capa provisoria de tierra entre las aplicaciones consecutivas de mezcla puede aplicarse con un grosor de 0,15 a 0,30 metros, y la capa final debe tener 0,6 a 1,2 metros de grosor. En la tabla

inferior se presentan las condiciones relevantes del sitio y del lodo así como criterios de diseño.

Tabla: Condiciones relevantes para el lodo y el sitio según el submétodo de capa de relleno de área.

Condiciones para el lodo y el sitio de relleno	
Contenido de sólidos del lodo	> al 15%
Características del lodo	Estabilizado
Hidrogeología	Posibilidad de aguas subterráneas y lechos superficiales
Declives del suelo	Adecuado para un declive mediano, pero se prefiere el terreno parejo.
Criterios de diseño:	
Necesidad de hinchazón	Sí
Necesidad de cubierta de tierra	Sí
Grosor de la cubierta	0,15 – 0,30 metros de capa provisional. 0,6 – 1,2 metros de capa final.
Necesidad de traer tierra de otros lados	Sí
Proporción de aplicación del lodo	3.800 – 17.000 m ³ /há
Equipos	Cargador frontal, motoniveladora de hoja recta, máquina aplanadora.

Los declives en las áreas de las capas deben ser relativamente planos para evitar que el lodo se desplome. Pero si el contenido de sólidos es alto o si se usa suficiente tierra para hincharlo, no hay riesgo de desplome y la formación de las capas se puede realizar en un terreno ligeramente inclinado.

Una de las ventajas de este método, es que cuando las áreas de relleno están terminadas son estables, por lo tanto no se necesita una gran mantención, además hay menos mano de obra y maquinarias involucradas.

Otra ventaja es que se utiliza poco terreno dadas las proporciones de aplicación, que van de 3.800 a 17.000 m³/há.

B. Eliminación conjunta

Esta operación consiste en disponer los lodos en un relleno de basura domiciliaria.

Mezcla basura / lodo

Se debe hacer una mezcla entre el lodo y la basura que sea lo más homogénea posible. Luego esta mezcla debe ser esparcida, comprimida y cubierta de la misma forma que en el relleno de basura. A continuación se muestra una tabla con los aspectos relevantes que se deben considerar en este método.

Tabla: Condiciones relevantes para el lodo y el sitio según el submétodo de eliminación conjunta de una mezcla de basura/lodo.

Condiciones para el lodo y el sitio de relleno	
Contenido de sólidos del lodo	> al 3%
Características del lodo	Estabilizado o no estabilizado
Hidrogeología	Posibilidad de aguas subterráneas y lechos superficiales
Declives del suelo	< al 30%
Criterios de diseño:	
Necesidad de hinchazón	Sí
Agente	Basura
Proporción	4 – 7 ton. de basura por 1 ton. Húmeda de lodo
Necesidad de cubierta de tierra	Sí
Grosor de la cubierta	0,15 – 0,30 metros de capa provisional. 0,6 metros de capa final.
Necesidad de traer tierra de otros lados	No
Proporción de aplicación del lodo	900 – 7.900 m ³ de lodo/há
Equipos	Cargador frontal, motoniveladora de hoja recta, máquina aplanadora.

Cuando el lodo posee un bajo contenido de sólidos debe ser rociado desde el estanque del camión sobre una capa de basura en el área de trabajo.

Es importante mencionar que los lodos con contenido de sólidos del 20% producen menos problemas de instalación y ambientales que el lodo con un contenido de sólidos menor.

CONSIDERACIONES DEL SITIO PARA EL RELLENO

• **Tamaño y vida del sitio de relleno**

La vida del sitio está determinada por la cantidad de lodo y el método de relleno. Al buscar el tamaño requerido se debe tomar en consideración que no todo el sitio se puede rellenar, así que este aspecto debe tratarse en los siguientes términos:

- Area total, es decir el área completa dentro del perímetro de la propiedad.
- Area de relleno que se puede usar, excluye el área de los caminos de acceso y acumulaciones de tierra. Comúnmente esta área ocupa el 50 - 70% del total.

Para determinar el tamaño del sitio, se pueden utilizar las siguientes variables: la vida del relleno, el método de relleno y la producción diaria de lodo; o bien, se puede determinar mediante el área utilizable, la cantidad de lodo y el método de relleno.

El método de relleno tiene un impacto en la vida y el tamaño del sitio, por ejemplo una zanja ancha usa menos tierra que una zanja angosta, y por lo mismo le proporciona al sitio una vida más larga.

• **Topografía**

Un suelo demasiado plano puede dar lugar a posas, uno muy inclinado se puede erosionar y ocasionar problemas operacionales. El relleno por lo general se limita a áreas que tienen inclinaciones mayores al 1% pero menores al 20%. Se reitera que el método de relleno determina en algún grado que operaciones son adecuadas para una topografía dada.

• **Agua de superficie**

La cantidad y naturaleza de las aguas superficiales son un factor importante en la selección del sitio. Se deben trazar mapas de las corrientes de agua y del drenaje que están en los sitios propuestos o cerca de ellos, además de estudiar su utilización actual y futura.

El tratamiento del lixiviado debe cumplir con las regulaciones establecidas en los permisos entregados para la instalación del relleno. Se debe tener en cuenta, que la selección del sitio con aguas superficiales puede combinar los problemas del diseño y las dificultades operacionales, además de dificultar obtener un permiso definitivo. Todo esto debe considerarse durante el proceso de selección.

- **Tierra y geología**

Se deben tomar en cuenta tanto las propiedades físicas e hidráulicas como las químicas.

- **Propiedades físicas e hidráulicas**

- Textura
- Estructura
- Profundidad y cantidad de tierra
- Permeabilidad y permisividad

En general, una geología ideal posee cierta combinación de suelos profundos y de textura fina. Mientras más fino sea el suelo, se necesita menos profundidad. Por ejemplo, los sitios que funcionan con arcilla o lomas arcillosas se han desempeñado con éxito con hasta 0,6 a 1,5 metros de suelo como cubierta que separa los depósitos de lodo de las elevaciones más altas de aguas subterráneas. Otros tipos de suelos requieren un espesor considerablemente mayor.

La cantidad y tipo de suelo que se necesita depende del método de relleno y de las características del lodo depositado.

La permeabilidad depende de la textura y estructura del suelo. Se reitera que los suelos de grano fino y de escasa estructura poseen las permeabilidades más bajas. A continuación se presentan las clases de permeabilidad para suelos saturados.

Tabla: Clases de permeabilidad para suelos saturados

Permeabilidad del suelo (cm/seg.)	Clase
$< 4,2 \exp^{-5}$	Muy lenta
$4,2 \exp^{-5}$ a $1,4 \exp^{-4}$	Lenta
$1,4 \exp^{-4}$ a $4,2 \exp^{-4}$	Moderadamente lenta
$4,2 \exp^{-4}$ a $1,4 \exp^{-3}$	Moderada
$1,4 \exp^{-3}$ a $4,2 \exp^{-3}$	Moderadamente rápida
$4,2 \exp^{-3}$ a $1,4 \exp^{-2}$	Rápida
$> 1,4 \exp^{-2}$	Muy rápida

Un suelo con permeabilidad moderadamente baja es ideal para un sitio de relleno.

El clima también influye en los requisitos del suelo de un sitio específico. Por ejemplo, en una zona con altos índices de lluvia las tierras con permeabilidad menor que las necesarias para el relleno podrían terminar en el llamado efecto bañera, es decir, acumulación de agua en una zanja que no puede drenarse.

- **Propiedades químicas**

- pH
- Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

El pH y la capacidad de intercambio del catión, influyen en la capacidad de los suelos para atenuar los cationes. La CIC se determina a grandes rangos por el contenido de arcilla del suelo.

Tabla: Proporciones estándares de los valores de la capacidad de intercambio del catión en distintos tipos de suelo.

Tipos de suelos	Rangos de capacidad de intercambio catiónico (meq/100g)
Suelo arenoso	1 a 10
Arena limosa	12 a 20
Arcilla y suelo orgánico	20

Los suelos con los valores más altos son más eficaces para eliminar los cationes, y por lo tanto son ideales para el sitio de relleno.

- **Agua subterránea**

Al evaluar la adaptabilidad del sitio para relleno es esencial recolectar y calificar los datos de las rocas acuíferas locales. La información debe incluir la profundidad del agua con altos y bajos que sean destacables, la pendiente hidráulica, la calidad del agua, su utilización actual y futura.

No debe ubicarse el relleno donde hay una posibilidad de contacto directo con el agua subterránea. Por lo tanto, se debe mantener la mayor distancia posible entre relleno y el nivel más elevado del agua subterránea.

Si es necesario se puede reunir más información realizando perforaciones en el mismo lugar. Los siguientes parámetros son relevantes para poder evaluar un sitio: elevación y fluctuación de las aguas subterráneas, conexiones hidráulicas con los acuíferos circundantes, pendiente hidráulica (declive del agua subterránea) y calidad del agua subterránea.

- **Vegetación**

Debe tomarse en cuenta la cantidad y tipo de vegetación en el posible sitio. La vegetación puede servir como amortiguador, reduciendo el polvo, el ruido, el mal olor y el aspecto antiestético. Sin embargo, los costos pueden aumentar en los lugares donde se necesita tala y retiro de vegetación.

- **Acceso al sitio**

Las rutas para el transporte de los sitios en proyecto deben usar las carreteras principales lo más posible.

- **Uso del suelo**

La zona que se utilice debe ser vista desde la perspectiva actual y futura. Se deben conseguir los permisos municipales para determinar las limitaciones y restricciones de construcción de cada sitio. En la etapa de selección debe considerarse el uso que se le dará al sitio ya terminado, además de evaluarlo en relación a futuras limitaciones de construcción.

- **Importancia arqueológica o histórica**

La investigación debe realizarse en las áreas que tengan más posibilidades de construcción. Cualquier hallazgo de importancia debe ser adaptado antes de la aprobación del sitio y el comienzo de la construcción.

- **Áreas de sensibilidad ambiental**

Se identifican 5 áreas sensibles:

- Suelos húmedos o pantanosos
- Terrenos aluviales
- Áreas de heladas permanentes
- Hábitats esenciales para especies en peligro de extinción
- Zonas de recarga de fuentes únicas de rocas acuíferas

No se deben escoger estas áreas cuando existen alternativas viables, ya que será más difícil obtener los permisos correspondientes. Además las medidas técnicas y administrativas serán más complejas.

- **Costos**

Al principio del proceso de selección se debe realizar una investigación económica de los sitios para determinar los costos relativos.

PROTECCIONES AMBIENTALES INVOLUCRADAS EN UN RELLENO

La medida de control ambiental más difícil y más costosa que se necesita en los rellenos sanitarios es la protección del agua subterránea. Sin dejar a un lado el agua superficial, ya que no se puede permitir la contaminación de ésta.

Otros puntos que hay que tener presente son la migración del gas metano (acumulación en las estructuras cercanas), malos olores, polvo, vectores y/o el aspecto estético.

Más adelante se presentan los conceptos del diseño que reducen al mínimo o evitan los efectos negativos que pueden causar en el medio ambiente la generación de lixiviados o la migración del gas metano.

A. Control de la lixiviación

La lixiviación puede provenir simplemente del exceso de humedad del lodo que se recibe en el relleno. El agua lluvia en la superficie del relleno puede añadir una cantidad limitada de agua al lodo enterrado. Sin embargo, esta superficie debe estar suficientemente inclinada para hacer que el agua de lluvia drene, además se deben desviar otros derrames de agua que se ubiquen alrededor del relleno. Se debe hacer notar que el relleno no debe estar en contacto con los estratos donde se produce la fluctuación de la napa freática. Este tipo de control positivo disminuye al mínimo la cantidad de lixiviación que se va a generar. En las áreas secas donde el rango de evaporación es mucho mayor que el de precipitación, existe cero infiltración, por lo tanto se limita a la cantidad de lixiviación que genera el lodo.

En la siguiente tabla se puede observar la composición y rangos de concentración que se obtuvieron del lixiviado de lodos residuales urbanos generados por la planta elevadora de ESVAL S.A.

Tabla: Proporción de los componentes de la lixiviación de lodos residuales urbanos

Análisis	Resultados	Rango tolerable
DBO mg/l	22.620	85.500 – 119.500
DQO total mg/l	23.936	-
DQO filtrado mg/l	15.993	-
Sólidos totales g/l	28,44	45,20 – 53,18
Sólidos totales volátiles g/l	16,67	24,86 – 27,12
Sólidos suspendidos g/l	2,22	3,989 – 4,859
Sólidos suspendidos volátiles g/l	0,868	2,194 – 2,231
Grasas y aceites g/l	0,4495	1,042 – 1,772
Nitrógeno total g/l	0,7116	0,899 – 0,930
Amonio g/l	0,9149	0,450 – 0,501
Coliformes fecales (NMP/ml)	2,4 e ⁶	2,4 e ⁵ – 72,4 e ⁸
Humedad (%)	98,6	80 – 70

Se debe destacar que la lixiviación depende de las características del lodo enterrado. Si el sitio ha sido adecuadamente diseñado, los constituyentes pueden atenuarse de manera efectiva mediante la tierra, o pueden recolectarse y luego ser tratados.

La lixiviación puede entrar en el agua por 2 formas:

- Filtración lateral o vertical, a través de la tierra hasta llegar a las rocas acuíferas del agua subterránea.
- Derrame en las aguas superficiales.

Siendo cuidadoso en la elección del sitio y prestando atención a las consideraciones del diseño, se puede evitar o reducir al mínimo la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por lixiviación.

Se puede lograr un control de la lixiviación mediante:

- **Condiciones naturales y atenuación**

Los elementos contaminantes de la lixiviación pueden atenuarse cuando pasan a través del suelo, mediante procesos biológicos - mecánicos y/o físico - químicos.

Los mecanismos mediante los cuales se realizan estos procesos incluyen: filtración, intercambio catiónico, absorción, precipitación química, biodegradación, formación de compuestos.

Las propiedades del suelo que influyen para que estos mecanismos sean efectivos son: tamaño de las partículas del suelo, contenido de materia orgánica, capacidad de intercambio del catión, pH, óxidos hidratados, contenido de cal del terreno.

Se debe dar preferencia a un suelo que ofrezca bajos niveles en permeabilidad, pero altos niveles de arcilla, capacidad de intercambio de catión y pH, en vez de tierras compuestas por partículas gruesas, con altas permeabilidades y valores bajos en la capacidad de intercambio de catión.

- **Aditivos que mejoran la tierra**

Es recomendable utilizar lo más posible el suelo escogido, y evitar el gasto de comprar y transportar el suelo desde otros sitios. Sin embargo, cuando el suelo del sitio y otras condiciones no son adecuadas para la contención de los lixiviados, o la atenuación tampoco es adecuada para proteger el agua subterránea, las permeabilidades del suelo pueden bajarse mediante la adición de arcillas importadas o de materiales poliméricos. Si las cantidades de arcillas naturales no son suficientes o no están presentes en el sitio, pueden encontrarse en el comercio materiales arcillosos como la bentonita u otros aditivos artificiales para mejorar el suelo.

A continuación se describe un procedimiento básico para la incorporación de aditivos al suelo para reducir la permeabilidad de éste.

- Seleccionar el aditivo más efectivo y determinar su rango de aplicación. Dichos rangos se basan en las características del suelo existente, es decir, en el tamaño de las partículas del suelo y el tamaño de los poros. Debe aplicarse el aditivo de tal manera que el suelo ya corregido tenga una permeabilidad de $1e^{-6}$ a $1e^{-7}$ cm/seg. Es recomendable realizar pruebas en el laboratorio para determinar la mezcla y el aditivo más efectivo.
- Preparar y nivelar el sitio. Se deben remover todas las raíces del suelo, las ramas, rocas y otros objetos que puedan penetrar en la capa del suelo ya corregido. Debe nivelarse el fondo del sitio para permitir que la lixiviación se drene hasta un punto de colección centralizado.
- Aplicar el aditivo introduciéndolo en el suelo existente a una profundidad aproximada de 30 cm.
- Compactar la mezcla suelo/aditivo para asegurar que constituye una barrera contra el agua.
- Se debe verter agua en el área para saturar completamente el suelo ya corregido. Los materiales arcillosos son muy impermeables al movimiento del agua cuando están húmedos, pero pueden agrietarse cuando están secos. Por eso, deben mantenerse húmedos antes de depositar el lodo para asegurar su integridad.

- Cubrir la capa de arcilla con otra capa de suelo de 30 cm de grosor para protegerlo durante la operación del relleno.

• **Revestimiento de membrana**

Dichos revestimientos deberían utilizarse cuando las permeabilidades o profundidades del suelo no son suficientes para proteger el agua subterránea. En lo posible, es recomendable usar suelos del mismo lugar. Sin embargo, cuando las condiciones del suelo resultan inadecuadas, se pueden usar muchos de los tipos de membranas y de otras capas delgadas que se encuentran en el mercado. Dentro de estos revestimientos los más comunes son los materiales sintéticos, asfálticos y poliméricos. Para seleccionarlos es necesario considerar los siguientes factores:

- Efectividad, sucede en algunos casos que los materiales no son compatibles con cierto tipo de lodo. Por lo tanto, se recomienda hacer pruebas preliminares con éste.
- Costo de la adquisición del material como de su instalación.
- Tiempo de instalación
- Durabilidad

Al momento de diseñar la membrana se debe tomar en cuenta la durabilidad de las uniones y también la longitud de los traslapes.

El diseño de un revestimiento de membrana sigue el mismo procedimiento que los revestimientos de arcilla, pero si la maquinaria va a ser usada sobre el lodo es posible que se necesite más cubierta.

No obstante se debe tener en cuenta que los revestimientos poseen desventajas como:

- La vida útil del revestimiento aún no se ha determinado en forma confiable.
- Las operaciones con el lodo pueden romper el revestimiento, haciendo que la lixiviación se filtre.
- Una vez instalado el revestimiento y depositado el lodo, no se pueden detectar y reparar con facilidad las fallas en la membrana.

• **Colección y tratamiento**

Puede consistir en un pozo colector que junte la lixiviación y luego la bombee a un estanque de almacenaje o a otro pozo. También puede colectarse mediante una serie de tuberías de drenaje que intercepten y conduzcan la lixiviación a la superficie o a un pozo colector.

La lixiviación que se recolecte puede tratarse mediante una o más de las siguientes formas:

- Descarga a un sistema de recolección o transporte directo a una planta de tratamiento biológico o físico – químico.
- Reciclaje a través del terreno.
- Evaporación en los pozos de colección.
- Tratamiento en el mismo sitio.

Dependiendo de las características de los lixiviados, el volumen y las regulaciones municipales, puede ser posible descargar éstos en un sistema de aguas servidas ya existente y luego tratar en conjunto. Para realizarlo, es necesario consultar a las autoridades pertinentes para ver en primer lugar si es posible la descarga de los lixiviados y luego conocer los requisitos necesarios para llevarlo a cabo.

Los mejores procesos para tratar la lixiviación recolectada en los rellenos con lodos no estabilizados son los procesos biológicos.

Los procesos físico – químicos son más efectivos para tratar la lixiviación de los rellenos que contienen lodo estabilizado.

Si la descarga al sistema de aguas servidas no es práctica o si la lixiviación perturba las operaciones de la planta de tratamiento, se deben usar tratamientos en el lugar o transportarla a un sitio de eliminación de lodos químicos.

El tratamiento en el sitio puede consistir en reciclar la lixiviación a través del relleno o colocarlo en una cuenca superficial para dejar que se evapore. El reciclaje de los lixiviados ha demostrado ser de utilidad, porque:

- Promueve el desarrollo rápido de la descomposición anaeróbica de los lodos.
- Aumenta el rango de predictibilidad de la estabilización biológica.
- Reduce el volumen de la lixiviación que debe manejar la evaporación durante períodos secos.

Sin embargo, los sistemas de reciclaje no son adecuados en la mayoría de los sitios, en especial en las áreas con alto porcentaje de aguas lluvias.

También puede ser útil tener un diseño que intercepte los lixiviados. Esencialmente esto consiste en construir una cantidad de pozos que puedan ser bombeados, luego el líquido extraído puede tratarse y descargarse.

B. Control de gas

El gas se produce por la descomposición de la materia orgánica del lodo. Los principales gases son el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4), aunque también se encuentra algo de oxígeno y nitrógeno. Además a veces en los rellenos hay indicio de amoníaco, sulfuro de hidrógeno y especies orgánicas volátiles. Los gases producidos dependen de la cantidad y características del lodo depositado, la humedad presente, etc.

Se puede esperar que la cantidad de gas generado por la descomposición del lodo vaya de 1 a $1,1 \text{ m}^3$ por kilo de materia orgánica reducida. En los desechos sólidos urbanos se genera de $0,3$ a $0,5 \text{ m}^3$ por kilo. Los lodos crudos probablemente generan alrededor de $0,5$ a 1 m^3 por kilo de sólidos secos. Debe esperarse que los lodos digeridos produzcan considerablemente menos gas, ya que la mayoría de éstos se generan en los digestores. Para todas las proporciones que se mencionaron anteriormente, tanto en la basura como en los lodos digeridos y crudos se debe considerar que el gas se genera durante un período extenso de tiempo que puede sobrepasar los 50 años.

El metano puede moverse por difusión a través del lodo hasta la atmósfera, disipándose sin producir daño. El gas también puede moverse lateralmente desde el relleno hasta los suelos adyacentes, en especial si el material de la cubierta es relativamente impermeable. Mediante estos movimientos puede filtrarse a instalaciones o construcciones cercanas, siendo peligroso cuando las concentraciones alcanzan el límite explosivo.

El gas que se genera también puede dañar la vegetación que rodea el sitio, acabando el oxígeno de la zona de la raíz de éstos.

La migración del gas puede controlarse instalando barreras al flujo del gas y/o recolectándolo y soltándolo.

Las técnicas de control del gas son generalmente clasificadas en métodos permeables y métodos impermeables.

- Métodos permeables

Estos implican la instalación de una zanja llena de grava fuera del área de relleno. La zanja intercepta el gas y lo suelta a la atmósfera. También puede ser apropiado usar un sistema de extracción al vacío en éstas.

- Métodos impermeables

Si se ubica una barrera de un material muy bajo en permeabilidad alrededor del sitio se minimiza la migración lateral del gas.

El movimiento del gas a través del suelo puede controlarse usando materiales que sean más permeables que el suelo adyacente.

El material más común que se usa como barrera es la arcilla compactada. Si es posible construirla, una capa de arcilla de aproximadamente 60 cm. de grosor sería adecuada. Pero a menudo se requiere una capa más gruesa para asegurar un sello adecuado, si la pendiente excede 2H:1V. Para hacer efectiva la capa de arcilla debe ser continua y no puede penetrarse. Debe construirse a medida que el relleno progresa, porque la exposición prolongada al aire hará que la arcilla se seque y que posteriormente se quiebre.

Un método efectivo para controlar el gas en los rellenos con basura, consiste en la ubicación de una red impermeable combinada con un sistema de extracción de gas, mediante respiraderos ubicados estratégicamente. No obstante, estos sistemas no son adecuados para los rellenos con lodo porque el alto contenido de humedad de éste no permite el movimiento del gas, ya que el lodo puede entrar y obstruir las tuberías de extracción por ser los diseños utilizados en los rellenos de lodos más pequeños que los utilizados para la basura, por lo que resulta poco probable obtener el gas generado en el relleno con lodos.

C. Manejo de aguas lluvias

Todo el drenaje de las tierras elevadas debería colectarse y manejarse alrededor del sitio del relleno, sólo si es absolutamente necesario podría conducirse a través de una tubería cerrada.

Los canales de drenajes pueden construirse de tierra, de tubería de metal corrugado o de acequias combinadas con piedras.

Se debe hacer notar que las dimensiones que se presentan sólo son demostrativas, las dimensiones reales para construir las instalaciones de drenaje se basan en pruebas realizadas en el mismo sitio.

El nivel de superficie debe ser superior al 2% para fomentar el escurrimiento y disminuir la acumulación, pero menos del 5% para reducir las velocidades del flujo y minimizar la erosión del suelo. Si es necesario se puede utilizar la vegetación para retener los sólidos provenientes del flujo.

D. Caminos de acceso

Como mínimo debería haber un camino permanente (con dos pistas) desde el camino público hasta el sitio. Para las instalaciones pequeñas un camino con un ancho de 5 metros es suficiente. Este debería estar cubierto con grava para permitir el acceso cuando las condiciones climáticas no sean buenas.

También se usan caminos temporales para entregar el lodo al área de trabajo desde los caminos permanentes.

Para los vehículos cargados, la mayoría de los declives deberían ser de menos del 7%.

E. Otras características del diseño de un relleno con lodos residuales urbanos

- Disponibilidad de tierra

La excavación y la acumulación de tierra deben estar estrechamente coordinadas con su uso por las siguientes razones:

Preferir programas de excavación acelerados durante los períodos de primavera – verano, para evitar la necesidad de excavar suelos en época de otoño – invierno.

Las acumulaciones de tierra deben localizarse de modo que el derrame no se dirija a las excavaciones adyacentes o a las áreas de relleno y se reduzca al mínimo la erosión.

- Edificios y estructuras

En instalaciones de gran tamaño o donde los climas son extremos, debe haber una construcción que albergue oficinas para el servicio de los operarios. Ya que a pesar del clima los rellenos funcionan durante todo el año, deben proporcionarse algunos elementos de protección para la gente que trabajará en el lugar, además deben existir instalaciones sanitarias tanto para el personal del relleno como para el de transporte.

Los edificios y los sitios que serán usados por menos de 10 años, pueden ser estructuras móviles y temporales. El diseño y la ubicación de todas las estructuras debe tomar en cuenta el movimiento del gas y el asentamiento diferencial causado por el lodo en descomposición.

- Servicios públicos

Las instalaciones que son de gran tamaño deben tener servicios sanitarios, electricidad, agua potable y comunicaciones. Los sitios remotos deberán agrandar los servicios existentes o usar sustitutos aceptables. Por ejemplo, se pueden utilizar baños químicos portátiles para evitar el alto costo de extender las redes de alcantarillado, el agua potable puede transportarse por camiones y la energía eléctrica puede provenir de un generador.

El agua debe estar disponible para beber, controlar el polvo, lavar los vehículos que traen los lodos antes que entren al camino público y para las instalaciones sanitarias de los empleados.

Es preferible extender la línea de alcantarillado en especial en sitios grandes y en aquellos donde la lixiviación se recolecta y trata con aguas servidas internas.

- Enrejado

El acceso a los rellenos debe limitarse a una o dos entradas que puedan cerrarse cuando no haya personal trabajando. Dependiendo de la topografía, de la vegetación en el sitio y áreas

adyacentes, las puertas de entrada pueden ser suficientes para evitar el acceso de personas ajenas al relleno y a los animales.

Se debe tener en cuenta que los requisitos del enrejado van a depender en gran medida del aislamiento relativo del sitio. Por ejemplo, los sitios ubicados cerca de zonas urbanas pueden necesitar un enrejado para mantener a los niños alejados.

- Iluminación

Si las operaciones de descargas ocurren en la noche, el área debe poseer una iluminación portátil.

- Áreas de lavado

Debe implementarse un programa de limpieza en los sitios donde los procedimientos operacionales provocan un contacto frecuente del equipo con el lodo. De esta forma, es posible eliminar el lodo adherido a los camiones que lo transportan y mantener los caminos libres de lodo y de barro.

MONITOREO

En los rellenos con lodos residuales urbanos se requiere de un conjunto de instalaciones para monitorear y controlar la posible contaminación del agua subterránea. Entre los objetivos de este control está el establecer datos básicos, detectar la contaminación, satisfacer los requisitos fiscalizadores, mantener una información actualizada del relleno o realizar proyectos de investigación sobre los niveles de contaminación con que contribuye un depósito de este tipo.

A pesar del objetivo particular de cualquier red de monitoreo esto constituye una componente integral en la operación del relleno con lodos. En términos ideales se debe usar para confirmar las predicciones y las evaluaciones que se realicen durante el desarrollo del proyecto, y la etapa del diseño con respecto a la protección del ecosistema, por lo general se centra en el agua subterránea, en forma ocasional en la superficial y en la migración del gas, ya que no es necesario un monitoreo de aguas superficiales y gas si no se presentan en el área del relleno masas de aguas superficiales y estructuras cercanas.

A. Monitoreo de aguas subterráneas

El análisis está relacionado con la necesidad de realizar un control de los agentes contaminantes que la lixiviación de los lodos pueda transportar.

- Condiciones hidrológicas

En un informe preliminar se deben determinar los siguientes puntos en la caracterización hidrológica del sitio.

Lecturas climatológicas. La información de interés debe incluir datos históricos de la intensidad de la lluvia caída en un período de 24 horas, datos sobre la precipitación máxima mensual y anual, además de información sobre la temperatura, evapo-transpiración y vientos.

Condiciones del agua subterránea. Se deben considerar los patrones sobre el curso del agua subterránea, profundidad y fluctuaciones del agua por estaciones, calidad y usos de ésta.

En cuanto a la calidad del agua, se debe tener en cuenta otros factores que pueden influir, como por ejemplo contaminación por pozos, fuentes de desechos, etc.

- Características del lodo

En términos ideales el desecho debe caracterizarse completamente antes de aplicarse como relleno. Las características de principal interés son los metales pesados (como el plomo, zinc, cadmio), nitratos, pH, contenido de sólidos, constituyentes orgánicos y cianuros.

- Características geológicas

Dependiendo de la intensidad del monitoreo, se realiza un estudio geológico en el mismo sitio, éste debe incluir toda la información de la estratigrafía del sitio hasta alcanzar la roca acuífera, incluyendo ésta.

- Instalaciones en terreno

Las instalaciones y ubicación de los pozos de monitoreo resultan esenciales para el desarrollo del relleno. En general, el programa de monitoreo se define después de haber determinado la lectura hidrogeológica y las características del lodo.

Las ubicaciones y profundidades para los pozos de monitoreo deben basarse en la información obtenida durante la investigación en terreno. Los pozos (con 3 metros o más de profundidad dentro del agua subterránea) deben ser ubicados en áreas que representen caminos óptimos para los elementos contaminantes que salen del relleno.

Pueden hacerse estimaciones aproximadas de la emigración de los elementos contaminantes hasta la superficie teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Edad del sitio de relleno
- Valores aproximados de la permeabilidad en la zona de superficie
- Direcciones y velocidades del flujo de aguas subterráneas

Toda esta información puede proporcionar una zona de mayor probabilidad para la detección de la lixiviación.

- Programa de monitoreo y muestra

La cantidad de pozos que se necesiten dependerá exclusivamente del sitio. Para determinar el número exacto de pozos y sus ubicaciones se debe consultar a un especialista.

La mayoría de estos pozos se deberían instalar al adquirir el sitio, ya que es preferible comenzar el monitoreo de 6 meses a un año antes de rellenar con el lodo para determinar la calidad del agua subterránea (incluyendo cualquier cambio de estación). Mediante el monitoreo será posible establecer si el relleno produce efectos sobre ésta.

- Colección de las muestras
- Materiales y equipo

El tipo de equipo que se utilice para tomar la muestra dependerá de la configuración física del relleno y del fondo.

La composición de los materiales seleccionados debe ser inerte, ya que así reducen los valores erróneos que se puedan tomar.

- Frecuencia de la muestra

La frecuencia depende de los objetivos de un programa en especial, es decir, si es a largo o corto plazo y de las características específicas del sitio (suelo y clima).

Los estudios realizados con tecnologías de punta indican que las lixiviaciones se liberan en altas concentraciones en intervalos periódicos que están influidos por las estaciones del año o el clima, esto puede indicar que se deben realizar esfuerzos más intensos para obtener muestras en ciertos períodos.

- Parámetros analíticos

Los parámetros que se deben tomar en cuenta en el análisis de las muestras del agua subterránea, dependen de la utilización del agua subterránea, los requisitos de la fiscalización, etc.

Basándose en las características del lodo es recomendable analizar pH, Conductividad eléctrica, sólidos disueltos, hierro, nitrato, cloro, carbono orgánico total y metales pesados (en especial plomo).

Se debe observar la temperatura y profundidad al momento de sacar la muestra.

Pueden hacerse comparaciones de los resultados obtenidos de ambos tipos de pozos, además de los estándares de agua potable y otro tipo de regulaciones realizadas.

Se deben observar las variaciones de los elementos contaminantes en las distintas estaciones.

B. Monitoreo de aguas superficiales

Por lo general, este monitoreo se implementa como un componente rutinario de la red total. La proximidad del relleno al agua de superficie y a los patrones de drenaje determinará si es necesario un monitoreo.

La selección de las estaciones de muestras, del equipo y de los procedimientos debe seguir un método similar al descrito para monitoreo de aguas subterráneas. Cada elemento de monitoreo debe ser evaluado en términos de compatibilidad con los constituyentes que se van a analizar.

Las estaciones deben ubicarse en áreas que representen la mayor posibilidad de contaminación, éstos puntos pueden determinarse después de examinar los caminos posibles para que la lixiviación entre en la masa de agua superficial.

C. Monitoreo de gas

Lo más común es que las zonas urbanas se encuentren lejos del relleno, con lo cual el monitoreo del gas no es necesario; pero cuando se requiere, el gas de mayor preocupación es el metano al alcanzar concentraciones superiores al 5%.

Los aparatos para tomar las muestras deben ubicarse en todas las direcciones donde se encuentren edificaciones de cualquier tipo; comúnmente se ubican en los límites de la propiedad y lejos del terreno, donde las estructuras estén en pasajes que son más susceptibles para la migración del gas.

Estos aparatos consisten en tuberías de gas simple y de bajo costo. La tubería es de polietileno, cobre o acero inoxidable; debido a que tienen un diámetro pequeño (6mm) una serie de estos elementos pueden ser ubicados a distintas profundidades dentro del mismo hoyo.

La técnica de colección de la muestra dependerá del tipo de tubería que se ha instalado. La frecuencia depende del programa de monitoreo. Cuando se necesite un monitoreo de gas las muestras deberán ser tomadas en el mismo período en que se toman las muestras de agua. Lo más común para monitorear el gas metano es un metro portátil que indica los porcentajes del gas, hasta el límite explosivo más bajo que es el 5%.

CLAUSURA DEL SITIO DE RELLENO

En este punto se plantean pautas básicas para desarrollar un plan de clausura del sitio de relleno. Dicho plan debe considerarse primero durante el proceso de selección del sitio y luego finalizarse durante el proceso de diseño. Para ello, se deberán contemplar los siguientes objetivos:

- Designar los procedimientos operacionales para la clausura del sitio.
- Establecer los criterios que deben considerarse antes de planificar la utilización final del sitio.
- Determinar la utilización final del sitio de relleno, la cual debe ser aceptable públicamente y ser práctica en términos técnicos.

Analizar éste plan es un paso para obtener la aprobación de un sitio propuesto, en especial cuando hay una participación activa de la comunidad en el proceso de selección del sitio. El relleno local debe representar un beneficio inmediato y futuro para la comunidad, por otro lado los usos proyectados del sitio deben ser realistas.

A. Procedimientos para clausurar

Los siguientes procedimientos se deben realizar cuando se ha concluido todo el relleno o un segmento de éste.

- El lodo debe cubrirse (nunca dejar expuesto), y si el lugar es inestable debe estar bien marcado, ya sea con tambores o cercos de madera. Aunque el rango de hundimiento varía, alcanzará su grado máximo durante el primer año. Por lo tanto, se debe proveer tiempo suficiente para que el área se acomode, y luego si es necesario debe volver a nivelarse.
- Erradicar las estructuras temporales y las áreas de recepción que no se necesitan para la utilización del sitio final.
- El sitio debe ser inspeccionado durante varios años después de que se haya clausurado, inspección que puede ser mensual o trimestral, después la inspección puede ser anual.
- La utilización del sitio debe ser compatible y complementaria con las actividades y condiciones naturales que existen, además deben ayudar a cumplir con las necesidades futuras de la comunidad.
- Una vez clausurado el sitio, el funcionamiento y los controles deben quedar en archivos. La descripción debe incluir tipo y ubicación de lodos, profundidad del relleno y alguna otra información que pueda resultar interesante para el futuro del sitio.

B. Características del sitio de relleno clausurado

Al planificar la utilización final del sitio, deben considerarse factores esenciales como el hundimiento, la capacidad de soporte, pendiente final, el control de la lixiviación y gas y la vegetación.

- **Hundimiento**

El hundimiento que se debe a la reducción de volumen ocasiona grietas y fisuras en el material de cubierta. Puede contribuir a movimientos verticales y horizontales con desplazamientos que van desde 15 cm a 90 cm. el hundimiento puede ocurrir dentro de algunos días después del relleno o extenderse por años. Se recomienda nivelar el sitio desde 3 a 5 veces después de la clausura.

El rango y la extensión del hundimiento son controlados por la interacción de una cantidad de variables:

- **Características del lodo**

Entre las más relevantes se destaca el contenido de sólidos, contenido de sólidos volátiles, tamaño y configuración de la partícula. Por ejemplo, un lodo con un contenido de sólidos del 15 al 20% puede hundirse más que el lodo con un contenido de sólidos mayor. De igual forma, mientras mayor sea el contenido de sólidos volátiles más grande será el grado de hundimiento.

- **Método de relleno**

El método también influye en el hundimiento, por ejemplo, aquellos que necesitan mezclar el lodo con tierra o con basura se hunden en forma distinta a aquellos que sólo usan lodo. El lodo con un contenido de sólidos bajo y que se ha depositado en zanjas puede formar fases líquidas y sólidas, los sólidos se hunden hasta el fondo y como resultado se forma una capa líquida en la superficie. Por el contrario, también puede ocurrir que los sólidos emerjan a la superficie, este efecto es causado por los gases producidos por la descomposición.

- **Características del suelo**

La cantidad de cubierta provisional y final también afectan el grado de hundimiento, ya que la sobrecarga sobre el desecho aumenta la infiltración del líquido hasta el suelo adyacente. Por lo tanto, se debe tener en cuenta la capacidad del relleno para soportar el peso o para inhibir la infiltración del agua.

- **Capacidad de soporte**

Esta mide la habilidad del relleno para soportar los cimientos. Esta capacidad de soporte depende de:

- Características del lodo
- Método del relleno
- Características del suelo (mezcla para hinchar el lodo y cubierta)
- Vegetación

Se dispone de poca información sobre la capacidad de soporte de este tipo de relleno con lodos residuales. Debido a esto, la construcción de las estructuras del relleno con lodos se debe restringir a áreas de suelos no alterados, donde el relleno con lodo no se ha producido antes.

- **Pendiente final**

Los declives o pendientes finales del terreno que se ha sometido al relleno con lodo generalmente deben ir del 2 al 5%.

- **Control de la lixiviación y gas**

La lixiviación y el gas seguirán produciéndose después de la clausura del sitio. Si no se controla apropiadamente el gas puede acumularse en estructuras o áreas cerradas. También en ciertas concentraciones puede impedir el crecimiento y formación de una capa vegetal.

Una capa impermeable ubicada en el relleno después de su clausura atenuará el potencial para la lixiviación, disminuyendo la infiltración de agua proveniente de la superficie.

Para prevenir problemas eventuales es conveniente incorporar controles para la lixiviación y el gas.

- **Vegetación**

La vegetación puede realizar funciones como manejar la infiltración, mejorar el aspecto visual y controlar la erosión (estabilizando los declives y reduciendo el derrame).