



**UNIVERSIDAD DE VALPARAISO
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA Y CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA DE INGENIERA AMBIENTAL**

**“PROPUESTA PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS
GENERADOS EN LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS
SERVIDAS DE MINERA ESCONDIDA LIMITADA”.**

**TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO AMBIENTAL
TESISTA: GONZALO ERNESTO SALAZAR PÉREZ
PROFESOR GUÍA: OCIEL COFRÉ
VALPARAÍSO, Diciembre del 2006.**

RESUMEN

Este trabajo se encuentra enfocado a la realización de una propuesta que le permita a Minera Escondida Limitada cumplir con la legislación actual y en desarrollo que aplica al existente manejo de los Lodos Secundario Residuales generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas ubicadas al interior del predio industrial. Para esto se realizó un estudio de la normativa Chilena relacionada con el manejo de Lodos considerando todos los requerimientos técnicos y operacionales que son aplicados a la Empresa y a partir de esto se desarrolló un análisis y selección de la mejor alternativa para implementar una propuesta de tratamiento de los Lodos que se adecuara de la mejor manera al estudio legal nombrado anteriormente.

El estudio comienza con un levantamiento de “Línea de Base” de la compañía, que señala el estado actual del manejo de Lodos Secundarios Residuales junto con otros aspectos considerados, para continuar con una investigación del escenario legal, actual y futuro, al cual dicho manejo se encuentra sujeto. Una vez que se caracterizan todos los escenarios, internos y externos, se procedió a escoger el tratamiento más adecuado que se le puede brindar al Lodo para cumplir con los escenarios dados a conocer anteriormente; para esto se recurrió al desarrollo de una serie de parámetros técnicos y operacionales que sirvieron como criterio de selección; llegando a obtener que el tratamiento más apropiado para aplicarse al tipo de Lodo Secundario Residual es la Estabilización Alcalina mediante el empleo de Cal Viva.

Finalmente se elaboró la propuesta de Estabilización Alcalina de Lodos Secundarios Residuales generados en la Empresa para mejorar o programar un cumplimiento legal actual y futuro, ésta considera el mezclado del Lodo con Cal para aumentar el pH y mantener un ambiente básico por el tiempo necesario que se necesite para alcanzar la estabilización.

INDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 PROBLEMA	3
1.3 OBJETIVOS.....	4
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	5
2.1. Descripción de la Empresa.....	5
2.2 Aguas Servidas o Residuales.....	6
2.2.1 Composición de las aguas residuales.	6
2.3 Tratamiento de Aguas Residuales o Servidas.....	7
2.3.1 Pre tratamiento de las aguas residuales.....	8
2.3.2 Tratamiento Primario.	8
2.3.3 Tratamiento Secundario.	8
2.3.4 Tratamiento avanzado (terciario).	8
2.4 Proceso de Lodos Activados.	9
2.4.1 Microorganismos.	10
2.5 Tipos de Lodos	10
2.5.1 Lodos Primarios.....	11
2.5.2 Lodos Secundarios	12
2.5.3 Lodos Terciarios o Químicos.	13
2.5.4 Producción de Lodos	14
2.6 Caracterización y Procedencia de los Lodos.....	14
2.7 Caracterización de los Lodos	16
2.7.1 Concentración de Sólidos.....	16
2.7.1.1 Sólidos Suspendidos Totales (ST).....	16
2.7.1.2 Sólidos Volátiles (SV).	16
2.7.1.3 Contenido de Humedad.....	17
2.7.2 Presencia de agua en los Lodos	17
2.7.3 Organismos Patógenos presentes en los Lodos.	18
2.7.3.1 Bacterias.....	18
2.7.3.2 Actinomycetes.....	19
2.7.3.3 Virus.....	20
2.7.3.4 Protozoos.....	20
2.7.3.5 Rotíferos.	21
2.7.3.6 Helmintos y Nemátodos.....	21
2.7.3.7 Fungi (Hongos).	21
2.7.4 Composición General del Lodo.....	23
2.7.4.1 Composición Química.....	23
2.7.4.2 Elementos Trazas (metales pesados)	23
2.7.5 Contenido energético de los Lodos.	24
2.8 Normativa Internacional.....	25
2.8.1 Normativa EPA (USA).....	25
2.8.2 Normativa E.U. (European Union).	26
2.9 Acondicionamiento de Lodos.....	27
2.10 Espesamiento de lodos	27
2.10.1 Procesos de Espesado.....	28
2.11 Procesos de Estabilización de los Lodos	31
2.11.1 Estabilización Biológica	32
2.11.1.1 Digestión Aerobia.....	32
2.11.1.2 Digestión Anaerobia.....	36
2.11.1.3 Estabilización Química.....	42

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA	58
CAPÍTULO 4 SITUACIÓN ACTUAL DE LA EMPRESA	62
4.1 Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas de la Empresa.	62
4.1.1 Introducción al Sistema de Tratamiento de las PTAS.	62
4.1.2 Descripción del proceso de Tratamiento de las PTAS.	63
4.1.2.6 Sistema de proporción de Aire a la PTAS.	64
4.1.3 Características generales de las Plantas.....	65
4.2 Producción de Lodos Secundarios.	65
4.2.1 Cantidad Estimada de Lodo Secundario generado.	66
4.3 Características del Lodo Secundario.	66
4.3.1 Sólidos Suspendidos Totales (SST).	67
4.3.2 Sólidos Suspendidos Volátiles (SV).....	67
4.3.3 Porcentaje de Humedad en peso(%).....	67
4.3.4 Densidad.....	68
4.3.5 Otras características de interés.	68
4.4 Tratamiento de Lodos Secundarios.	68
4.4.1 Digestión Aerobia.	69
4.4.1.1 Condiciones Operacionales.	69
4.4.2 Deshidratación de Lodos Secundarios.	69
4.5 Disposición Final de Lodos Secundarios.	70
4.5.1 Mono Relleno, Trincheras de Infiltración.	70
4.5.1.1 Características del sistema de Disposición Final o Mono Rellenos.....	70
4.5.1.2 Capacidad actual del Sistema de Disposición Final de Lodos o Trincheras.	70
4.6 Impactos Ambientales Identificados en el Tratamiento y Disposición Final de Lodos.....	71
4.6.1 Generación de Olores.....	71
4.6.2 Infiltración de agua contaminada al subsuelo.....	71
CAPÍTULO 5 ESTUDIO LEGAL APLICADO AL MANEJO DE LODOS.	73
5.1 Requerimientos Legales.	73
5.1.1 Obtención de Permisos y Tramitación.....	73
5.1.2 Requerimientos Legales Operacionales.....	75
5.1.3 Requerimientos Legales Técnicos.....	76
5.1.3.1 Sobre la Clasificación de Lodos.....	77
5.1.3.2 Sobre el Almacenamiento de los Lodos	79
5.1.3.3 Sobre el Transporte de Lodos.	80
5.1.3.4 Sobre la Disposición Final de Lodos.....	80
5.1.3.4.1 Rellenos Sanitarios	80
5.1.3.4.2 Mono-Rellenos.....	81
5.1.4 Selección de Requerimientos Legales Técnicos aplicados a la Empresa... 81	
5.1.4.1 Políticas Principales del Plan Estratégico del Negocio de la Empresa. 82	
5.1.4.2 Políticas Principales de la Vicepresidencia HSE.	82
5.1.4.3 Políticas Principales de la Superintendencia de Medio Ambiente.	82
5.1.4.4 Requerimientos Legales Técnicos Aplicados a la Empresa.	83
5.1.4.4.1 Disposición Final.....	83
5.1.4.4.2 Tratamiento.....	84
5.1.4.4.3 Almacenamiento	85
5.1.4.4.4 Transporte.....	86
CAPÍTULO 6 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO . 87	
6.1 Análisis de las Alternativas de Tratamiento Acordadas.....	87
6.2 Resultado del análisis.....	89
CAPÍTULO 7 PROPUESTA DE TRATAMIENTO.....	92
7.1 Propuesta para el tratamiento de Lodos Secundarios.....	92
7.2 Descripción del Proceso propuesto.	92
7.3 Características Operacionales de los Elementos del Proceso	94

7.3.1 Línea de Cal	94
7.3.2 Línea de Lodo Secundario.....	95
7.3.3 Tratamientos alternativos.....	96
CAPÍTULO 8 BALANCE DE MASA	97
8.1.1 Línea de Lodo Secundario.....	97
8.1.2 Línea de Cal	104
8.1.3 Tratamientos Alternativos.	105
8.1.4 Diagrama general del Balance de Masa.....	106
CAPÍTULO 9 EVALUACIÓN ECONÓMICA	107
9.1 Tamaño y Localización.	108
9.2 Equipos.....	108
9.3 Obras Físicas.....	111
9.4 Personal.....	112
9.5 Insumos.	112
9.6 Flujo de Caja.....	114
CAPÍTULO 10 CONCLUSIONES Y DISCUSIONES.	117
BIBLIOGRAFÍA.....	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Caracterización de aguas residuales domésticas.	7
Tabla 2.2: Cantidades de Lodos Terciarios o químicos.....	13
Tabla 2.3: Producción y concentración de sólidos totales para distintos tipos de Lodos.	14
Tabla 2.4: Procedencia de Sólidos y Lodo.	15
Tabla 2.6: Promedios típicos de Coliformes presentes en ciertos materiales.	19
Tabla 2.7: Organismos patógenos y enfermedades potenciales.....	22
Tabla 2.8: Composición Química típica del Lodo crudo y digerido.....	23
Tabla 2.9: Contenido típico de metales en el Lodo de agua residual.....	24
Tabla 2.11: Utilización del espesado por gravedad.....	28
Tabla 2.12: Utilización del espesado por Flotación.	29
Tabla 2.13: Utilización del espesado por Centrifugación.....	30
Tabla 2.14: Utilización del espesado por Filtro de banda.....	31
Tabla 2.15: Utilización del espesado por Tambores rotativos.	31
Tabla 2.17: generación de calor y reducción de sólidos volátiles (ATAD).....	34
Tabla 2.18: Características típicas de operación (ATAD).....	35
Tabla 2.19: condiciones operacionales de la digestión anaerobia de Lodos.	37
Tabla 2.20: Coeficientes de balances entre el metano y la DQO.....	40
Tabla 2.21: Químicos usados en el tratamiento de Lodos.	43
Tabla 2.22: Dosis de cal para alcanzar una Lodo Clase B.....	44
Tabla 2.23: Requerimientos de Lodos Clase B.	44
Tabla 2.24: Equilibrio de pH con la aplicación de cal.	46
Tabla 2.25: Productos de cal: promedios físicos y químicos.....	49
Tabla 2.26: información sobre silos de almacenamiento (12 pies de diámetro, 60% de cono).....	51
Tabla 2.27: Información típica de un proceso BIO*FIX	54
Tabla 2.28: Propiedades del producto del proceso N-Viro	56
Tabla 4.1: Características de las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas.....	65
Tabla 4.2: Valores de producción de Lodos secundarios en exceso crudos por Planta de Tratamiento de Agua.	66
Tabla 4.3: Resultados, ST (mg/l).	67
Tabla 4.4: Resultados, SSV (mg/l)	67

Tabla 4.5: Resultados, % en peso de Humedad.	67
Tabla 4.6: Resultados, Densidad (masa/volumen).....	68
Tabla 4.7: Resultados, Otras características de interés.	68
Tabla 4.8: Características operacionales llevan a una no conformidad operacional....	69
Tabla 4.10: Cantidad y porcentaje de agua Evaporada del Lodo.....	72
Tabla 5.1: Requisitos Legales Técnicos en la Disposición Final de Lodos.	84
Tabla 5.2: Requisitos Legales Técnicos para el Tratamiento.....	85
Tabla 5.3: Requisitos Legales Técnicos para el Almacenamiento.	85
Tabla 5.4: Requisitos Legales Técnicos para el Transporte.....	86
Tabla 6.1: Resultado de análisis de acuerdo a cada parámetro y proceso.....	89
Tabla 6.2: Ventajas y desventajas en de los procesos analizados	90
Tabla 8.2: datos conocidos para Balance de Masa.....	101
Tabla 8.3: Flujos Másicos y Molares (Mezclador).	103
Tabla 9.1 Características de producción de Lodos (50% adicional).....	107
Tabla 9.2: Capacidades de carga y volumétrico de Elementos.....	108
Tabla 9.3: Características Técnicas de las Tuberías.....	109
Tabla 9.4: Características técnicas de las bombas necesarias.	109
Tabla 9.5: Costos y depreciación de cada equipo.....	110
Tabla 9.6: Costos Asociados a las obras físicas de la propuesta.	112
Tabla 9.7: Mano de obra (personal).	112
Tabla 9.8: Costos en combustible.	113
Tabla 9.9: Costos de energía.	114
Tabla 9.10: costos anuales de combustible, personal y mantenimiento.	115
Tabla 9.11: Inversión Inicial y Costos asociados al proyecto.	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Proceso biológico general de Lodos Activados (Metcalf y Eddy, 1995).....	9
Figura 2.5: Efectos del pH sobre el comportamiento del gas amonio (Girovich, 1996).	47
Figura 2.6: Efectos del pH sobre el comportamiento del sulfuro de hidrógeno (Girovich, 1996).....	48
Figura 2.7: Diseño común de un silo (Girovich, 1996).....	52
Figura 3.1: Esquema de Metodología Empleada.	61
Figura 4.1: Plantas de Tratamiento de Minera Escondida Limitada (Minera Escondida).	65
Figura 4.2: Evaporación en el Lugar de Disposición Final (Minera Escondida).	72
Figura 5.1: Clasificación Sanitaria de Lodos.	77
Figura 7.1: Diagrama del Procesos Propuesto.....	93
Figura 8.1: Flujos másicos de entrada y salida del mezclador.....	103
Figura 8.2: Diagrama del Balance de Masa del Proceso.....	106

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN.

Chile es un país minero, ya que contiene más del 40% de la reserva mundial de cobre. Es por esto que durante las últimas dos décadas se han instalado una serie de Mineras privadas que le dejan al estado Chileno una gran cantidad de recursos financieros por medio de los impuestos.

Minera Escondida Limitada es una de las mineras de cobre con mayor producción a nivel mundial, representando el 8% de la producción cuprífera mundial. La producción de cobre se realiza mediante la formación de concentrado, a través de un proceso de flotación de mineral sulfurado, y cátodos de cobre utilizando un proceso de lixiviación de mineral oxidado. Es la Minera Privada de cobre más grande del mundo extrayendo 1,3 millones de toneladas de cobre fino al año. Para alcanzar esta producción la Empresa debe dotar a unos 4000 trabajadores directos y 6000 indirectos.

La presencia de tal magnitud de trabajadores hace que la Empresa deba cumplir con una serie de requerimientos legales ocupacionales y ambientales de acuerdo a las normativas ya existentes y las que se van desarrollando a la par con la operación de la Mina.

Esta cantidad de trabajadores genera una aguas servidas que deben ser tratadas de acuerdo a la legislación ambiental vigente; es por esto que la empresa, desde que ha comenzado a operar, ha ido construyendo y ampliando Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas al interior del predio industrial que se ubica a 170 Km al noreste de la ciudad de Antofagasta.

Al año 2006, existen en la Empresa 5 Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas para cumplir con la legislación ambiental vigente. La operación de estas Plantas genera un Lodo que contiene contaminantes que ponen en peligro al Medio Ambiente. Este Lodo debe ser manejado en forma sustentable de manera de mitigar o disminuir la presencia de contaminantes, sin embargo no existen instrumentos legales actuales que se manifiesten sobre esto.

No obstante se están desarrollando algunos instrumentos legales que se pronuncian en el manejo de estos residuos, y es en base a éstos que los generadores deben basar sus operaciones de manejo.

La Empresa ha querido administrar estos requerimientos legales en desarrollo y adecuar su actual sistema para manejar estos residuos de manera de aminorar las futuras amenazas legales, mitigar o disminuir la contaminación ambiental y mantener una buena comunicación y relación con las autoridades Chilenas, cumpliendo con responsabilidad cada normativa a que Minera Escondida se encuentra sujeta.

1.2 PROBLEMA

El gobierno Chileno ha incrementado su preocupación acerca del manejo de lodos generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas sobre todo desde que se produjo el reciente reclamo por los habitantes de la comuna de Pudahuel de la Región Metropolitana debido al mal manejo de los lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas ubicadas en las instalaciones de La Farfana.

Es por esto que el Gobierno ha tomado con mayor seriedad este tema adoptando medidas de cumplimiento que obligan a los generadores de lodos a considerar en sus operaciones costos dedicados a disminuir o eliminar el impacto ambiental que produce el manejo de este tipo de residuos. Una de estas medidas es la emisión de un Reglamento Supremo que lleva como título “Reglamento Para el Manejo de Lodos Generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas”, que se encuentra en estos momentos en revisión por la Contraloría de la República Chilena y que ya ha sido aprobado por la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). Para el cumplimiento de este reglamento los generadores de lodos deberán implementar un proyecto de ingeniería que se adecue a los requerimientos que éste señala.

Minera Escondida Limitada genera alrededor de 301 m³/mes de lodos provenientes de sus Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas y posee un sistema de manejo de estos residuos el cual se desarrolló de acuerdo a los requerimientos solicitados por el Servicio de Salud de la II Región de Antofagasta. Sin embargo éstos no son compatibles con las especificaciones técnicas que señala el futuro Reglamento, por lo que la empresa se encontraría con una clara amenaza de incumplimiento legal al momento de que éste sea publicado en el diario oficial, contradiciendo las políticas, Estrategias, Planes Operacionales y valores de la compañía.

1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Elaborar una propuesta para el tratamiento y disposición final de Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas, fosas sépticas y Baños Químicos de Minera Escondida Limitada de acuerdo con lo indicado en el futuro Reglamento.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un análisis de la situación actual del manejo de Lodos generados en la Empresa.
- Efectuar un estudio de los requisitos legales técnicos y operacionales con respecto a la estabilización de Lodos Secundarios generados.
- Formular un Análisis de las posibles alternativas de estabilización de Lodos Secundarios de acuerdo a los requisitos legales, objetivos de la compañía y pronunciamiento de la Superintendencia de Medio ambiente de la Empresa.
- Diseñar una propuesta definitiva de Tratamiento de Lodos Secundarios generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1. Descripción de la Empresa

Minera Escondida Limitada es una de las mineras de cobre con mayor producción a nivel mundial, representando el 8% de la producción cuprífera mundial. Se encuentra ubicada en el Norte de Chile, en el desierto de Atacama, a 170 Kilómetros al Sureste de la ciudad de Antofagasta. La producción de cobre se realiza mediante la formación de concentrado, a través de un proceso de flotación de mineral sulfurado, y cátodos de cobre utilizando un proceso de lixiviación de mineral oxidado.

La construcción de la mina se inició en Agosto de 1998 y, en Noviembre de 1990, se procesó por primera vez el mineral. Desde entonces la inversión total de Escondida alcanza los US\$ 4000 millones.

El yacimiento es explotado a través de la extracción a rajo abierto por medio de un sistema de bancos o cortes escalonados movilizándolo alrededor de 350 millones/año de toneladas de material. Para fracturar la roca se realizan explosiones controladas después de las cuales, el mineral es recogido, por palas electromecánicas, y depositado en camiones de transporte de carga.

El mineral sulfurado ingresa a dos máquinas chancadoras semi móviles, ubicadas dentro del rajo. Posteriormente, se transfiere a través de correas transportadoras a las áreas de acopio cubiertas ubicadas a un costado de las plantas concentradoras Los Colorados y Laguna Seca. El mineral oxidado, en tanto, se destina al proceso de chancado ubicado fuera de la mina para la posterior producción de cátodos de cobre (<http://www.escondida.cl>).

El mineral sulfurado se procesa a través de un proceso de flotación. En la planta concentradora el cobre es separado de la roca estéril. El primer paso es reducir el tamaño del mineral para liberar las partículas que lo contienen, proceso denominado molienda. El mineral triturado se envía a través del circuito de flotación primaria y luego pasa a un circuito de limpieza produciendo el concentrado en forma de pulpa espesa. Luego de este proceso la pulpa es desaguada parcialmente, almacenada por un tiempo en tanques y transportada, a través de un mineroducto de 165 Km de extensión, a la planta de filtros en el puerto de Coloso para su posterior secado y embarque.

Los embarcos de cobre están destinados principalmente a Japón, Alemania, Canadá, China, Suecia, Brasil, Corea del Sur y Francia, entre otros países (<http://www.escondida.cl>).

El mineral oxidado es tratado a través de un proceso de lixiviación, extracción por solventes, y electro obtención para producir cátodos de cobre. El proceso comienza con el chancado del mineral que luego se deposita en grandes pilas con base impermeable donde es sometido a la acción de ácido sulfúrico para disolver lentamente el cobre e incorporarlo a una solución rica en cobre. Luego esta solución es sometida al proceso de extracción por solventes cuyo objetivo es transferir selectivamente el mineral contenido en la solución rica en cobre a otra, limpia de impurezas llamada solución de electrolito mediante la ayuda de un fluido llamado orgánico. Posteriormente el proceso de electro obtención consiste en la aplicación de corriente eléctrica continua a las soluciones de electrolito de cobre, logrando que el mineral se deposite en placas de acero inoxidable. En cinco días, el cátodo de cobre adquiere un peso aproximado de 78 Kilogramos con una pureza del 99,99%. Los cátodos son transportados vía ferrocarril al puerto de Antofagasta para su posterior embarque. Éstos están destinados principalmente a Japón, Alemania, Canadá, China, Suecia, Brasil, Corea del Sur y Francia (<http://www.escondida.cl>).

2.2 Aguas Servidas o Residuales.

Toda comunidad genera residuos tanto sólidos como líquidos. La fracción líquida de los mismos (aguas residuales) es el agua de que se desprende la comunidad una vez que ha sido contaminada durante los diferentes usos para los cuales ha sido empleada. Desde el punto de vista de las fuentes de generación, podemos definir el agua residual como la combinación de los residuos líquidos procedentes de residencias como de instituciones públicas y establecimientos industriales y comerciales, a los que pueden añadirse, aguas subterráneas, superficiales y pluviales (Metcalf y Eddy, 1995).

2.2.1 Composición de las aguas residuales.

Se refiere a las cantidades de constituyentes físicos, químicos y biológicos presentes en este tipo de aguas.

En la Tabla 2.1 se presentan datos de los constituyentes encontrados en el agua residual doméstica de acuerdo al DS N°609/98 (“Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado”) y a la bibliografía temática.

Tabla 2.1: Caracterización de aguas residuales domésticas.

Parámetros	Unidades	Valor Característico
Aceites y Grasas	mg/l	60
Arsénico	mg/l	0,05
Cadmio	mg/l	0,01
Cianuro	mg/l	0,2
Cobre	mg/l	1
Cromo Total	mg/l	0,1
Cromo Hexavalente	mg/l	0,05
DBO, 5 días, 20°C	mg/l	250
Fósforo	mg/l	5
Hidrocarburos	mg/l	10
Mercurio	mg/l	0,001
Níquel	mg/l	0,1
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	50
PH		6 - 8
Plomo	mg/l	0,2
Poder Espumógeno	mm	5
Sólidos Sedimentables	ml/L 1hr	6
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	220
Sulfatos (disueltos)	mg/l	300
Sulfuro	mg/l	3
Temperatura	°C	20
Zinc	mg/l	1
Coliformes totales	NMP/100 ml	$10^6 - 10^7$
Compuestos orgánicos volátiles	ug/l	<100

Fuente: Ministerio de Obras Públicas (DS N°609/98); Metcalf y Eddy, 1995.

2.3 Tratamiento de Aguas Residuales o Servidas.

Los métodos de tratamiento de las aguas residuales empezaron a desarrollarse ante la necesidad de velar por la salud pública y evitar las condiciones adversas provocadas por la descarga del agua residual al medio ambiente. Se conoce como operaciones unitarias a los métodos de tratamiento en los que predominan los fenómenos físicos, y como procesos unitarios a los métodos donde predominan los fenómenos químicos y/o biológicos (eliminación de contaminantes). En la actualidad, las operaciones y procesos unitarios se agrupan entre sí para constituir los así llamados tratamiento primario, secundario y terciario (Metcalf y Eddy, 1995)

El tratamiento primario contempla el uso de operaciones físicas (sedimentación y desbaste) para la eliminación de los sólidos sedimentables y flotantes presentes en el agua residual. El tratamiento secundario son procesos biológicos y químicos los que se emplean para eliminar la mayor parte de la materia orgánica.

En el tratamiento terciario se emplean combinaciones adicionales de los procesos y operaciones unitarias con el fin de eliminar otros componentes, tales como el nitrógeno y el fósforo, cuya reducción no se produjo en el tratamiento secundario.

2.3.1 Pre tratamiento de las aguas residuales.

Proceso de eliminación de los constituyentes de las aguas residuales cuya presencia pueda provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos, operaciones y sistemas auxiliares. Entre estos se encuentran el desbaste, la dilaceración para la eliminación de sólidos gruesos y trapos, la flotación para la eliminación de grasas y aceites, y el desarenado para la eliminación de la materia en suspensión gruesa (Metcalf y Eddy, 1995).

2.3.2 Tratamiento Primario.

Se elimina una fracción de los sólidos en suspensión y de la materia orgánica del agua residual. Suele llevarse a cabo mediante operaciones físicas como el tamizado y la sedimentación. El efluente del tratamiento primario suele contener una cantidad no menor de materia orgánica y una DBO_5 alta (Metcalf y Eddy, 1995).

2.3.3 Tratamiento Secundario.

Se encuentra principalmente encaminado a la eliminación de los sólidos en suspensión y de los componentes orgánicos biodegradables, aunque a menudo se incluye la desinfección como parte del tratamiento secundario. Esta parte del proceso corresponde a una combinación de diferentes operaciones empleados para la eliminación de estos constituyentes, e incluye el tratamiento biológico con Lodos Activados, reactores de lecho fijo, los sistemas de lagunaje y la sedimentación (Metcalf y Eddy 1995).

2.3.4 Tratamiento avanzado (terciario).

Corresponde al nivel de tratamiento necesario para eliminar los constituyentes de las aguas residuales que merecen especial atención, como los nutrientes, compuestos tóxicos y los excesos de materia orgánica o de sólidos en suspensión. Otras operaciones unitarias incluyen la coagulación química, la floculación, y sedimentación seguida de filtración y carbono activado. Para la eliminación de iones

específicos y para la reducción de sólidos disueltos, se emplean métodos menos comunes como el intercambio iónico o la osmosis reversa.

2.4 Proceso de Lodos Activados.

El proceso de Lodos Activados es el proceso aerobio biológico más utilizado para el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales. Consiste en un reactor llamado *tanque de aireación*, un *tanque de sedimentación*, reciclado de sólidos al tanque de aireación procedente del tanque de sedimentación y una línea de purga del Lodo (ver Figura 2.1) (Rittman y McCarty, 2001).

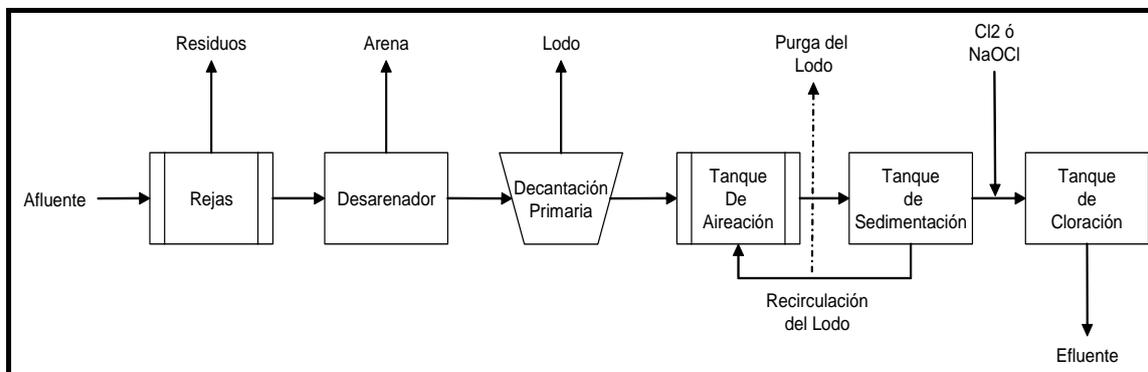


Figura 2.1: Proceso biológico general de Lodos Activados (Metcalf y Eddy, 1995).

El tanque de aireación es un reactor de crecimiento en suspensión que contiene conjuntos microbianos o flóculos de microorganismos denominados Lodos Activados. Los microorganismos consumen y oxidan el aporte de donantes orgánicos de electrones denominados en conjunto a la DBO (demanda bioquímica de oxígeno). El lodo activado se mantiene en suspensión en el reactor mezclado por un sistema de aireación.

Cuando el Lodo del agua tratada y flóculos microbianos pasan al tanque de sedimentación, los flóculos se eliminan del agua tratada por sedimentación y vuelven al tanque de aireación o de residuos disminuyendo así el Tiempo de Detención Hidráulico.

El efluente limpio se descarga al medio ambiente de diferentes formas. Las claves del proceso de lodos activados son la captura de flóculos en el tanque de sedimentación y su reciclado al reactor, debido a que conducen una elevada concentración de microorganismos al reactor. La elevada concentración de biomasa permite que el tiempo de detención del líquido sea pequeño, generalmente de horas.

La purga de sólidos a través de la línea independiente de purga de Lodo hace que el tiempo de retención de sólidos (TRS) sea independiente y mucho mayor que el tiempo de detención hidráulico.

2.4.1 Microorganismos.

El Lodo activado contiene una gran variedad de microorganismos como bacterias, protozoos, nemátodos, rotíferos, bacteriófagos y hongos (en menor medida). La mayoría de estos organismos se mantienen juntos dentro de los flóculos mediante polímeros orgánicos producidos naturalmente y fuerzas electrostáticas.

Los principales consumidores de residuos orgánicos son las bacterias heterótrofas (alimentación de sustrato).

La mayoría de los géneros de bacterias en el Lodo activado son Gramnegativas, los géneros principalmente identificados incluyen *Pseudomonas*, *Antrobacter*, *Comamonas*, *Lofomonas*, *Zooglea*, *Esferotilus*, *Azotobacter*, *Cromobacterium*, *Acromobacter*, *Flavobacterium*, *Bacilos* y *Nocardia* (Rittmann y McCarty, 2001).

En el Lodo activado se han identificado muchas especies de protozoos. Aunque no son los principales consumidores de residuos orgánicos en el proceso, son conocidos como indicadores útiles del funcionamiento ya que se considera que un Lodo es bueno cuando presenta prominentes cantidades de protozoos ciliados (Rittman y McCarty, 2001).

También se encuentran a menudo en el Lodo rotíferos, nemátodos y otras formas multicelulares pero su papel no resulta evidente (Rittman y McCarty, 2001).

2.5 Tipos de Lodos

Generalmente, las operaciones en las plantas de tratamiento de aguas residuales se pueden dividir en las siguientes:

- Tratamiento preliminar.
- Tratamiento primario.
- Tratamiento secundario.
- Tratamiento terciario o avanzado.
- Desinfección.
- Tratamiento del Lodo.

En los tratamientos de aguas servidas comúnmente se generan dos tipos de Lodos, estos son los Lodos Primarios y Lodos Secundarios, los segundos se producen en los tratamientos biológicos como consecuencia de la producción en exceso de biomasa.

Los Lodos primarios se pueden biodegradar, la producción de biogás producto de la digestión es alta y su posterior deshidratación es normalmente buena. La calidad del Lodo primario depende de las características del agua residual y del tiempo de retención en el tanque de pre-sedimentación (Spinosa y Vesilind, 2001).

También existen los Lodos terciarios o químicos que se generan por la adición de agentes químicos en el proceso de tratamiento de las aguas residuales (Spinosa y Vesilind, 2001).

2.5.1 Lodos Primarios

Se generan en el tratamiento primario de las plantas de tratamientos, y se componen de basura, grasa y sólidos sedimentables. Es un tipo de Lodo altamente oloroso, posee tipos de materiales sólidos que lo hace estéticamente indeseable y es peligroso. Muchos de los organismos patógenos presentes en las aguas residuales se encuentran adheridos a las partículas sólidas (Spinosa y Vesilind, 2001).

- Estimación de Producción de Lodos Primarios.

La estimación de Lodos Primarios puede ser llevada a cabo por diferentes niveles. Algunos libros señalan que las plantas de tratamiento de aguas servidas producen alrededor de 80 gr de sólidos secos/capita/día. Recopilando la información de 26 plantas de tratamiento de aguas servidas en Estados Unidos, se concluyó que los sólidos (secos) se producen a una tasa entre 0,2 y 0,3 Kg/m³, con una media de 0,25 Kg/m³ (Spinosa & Vesilind, 2001). La tasa de remoción aumenta con el decaimiento del tiempo de retención. Basándose en la información obtenida de 18 plantas de tratamiento de aguas residuales en Estados Unidos, la estimación de la tasa de remoción puede ser expresada con la ecuación (Spinosa y Vesilind, 2001):

$$Etr = \frac{1}{k} \quad [\text{Ec. 2.1}]$$

Donde:

Etr : Tasa de remoción de Lodos Primarios (adimensional).

k : Constante estimada en 0.00609 (adimensional).

Una estimación de producción de Lodos primarios bibliográficamente se encuentra entre 2500 y 3500 litros (660 a 925 galones) por cada millón de litros tratados en las plantas de tratamiento de aguas residuales (Spinosa y Vesilind, 2001).

2.5.2 Lodos Secundarios

El método de tratamiento más popular es el proceso de Lodos Activados. Desafortunadamente este proceso produce un exceso de biomasa que debe ser removido. Esta biomasa se denomina Lodo activado en exceso o *Lodo Secundario*. Éste es significativamente diferente al Lodo primario y posee gran cantidad de bacterias y otros organismos (Spinosa y Vesilind, 2001).

Este Lodo es el más difícil de deshidratar debido a que el tipo de agua presente en él se encuentra adherida física y químicamente lo que causa una mayor atención en posteriores tratamientos como es la Deshidratación.

- Estimación de Producción de Lodos Secundarios.

Para los procesos de Lodos activados, la cantidad de Lodo Secundario se puede estimar usando información tanto empírica como de crecimiento cinético. Usando la data de 18 plantas de tratamiento de aguas residuales en Estados Unidos, la producción de Lodo secundario puede ser estimada por la ecuación (Spinosa y Vesilind, 2001):

$$W_{ae} = W_i + (a \times W_{ssv}) + (b \times BOD_{sol}) \quad [\text{Ec. 2.2}]$$

Donde:

W_{ae} : Producción de Lodo Secundario (Kg de sólidos secos/día)

W_i : Inertes, estimado como los sólidos suspendidos fijos en el efluente del clarificador primario (Kg/día).

a : Constante entre 0,6 y 0,8

W_{ssv} : Sólidos suspendidos volátiles en el efluente del clarificador primario (Kg/día).

b : Constante entre 0,3 y 0,5.

BOD_{sol} : DBO soluble en el efluente del clarificador primario (Kg/día).

2.5.3 Lodos Terciarios o Químicos.

Los Lodos químicos son producidos por procesos de tratamientos avanzados en el tratamiento de aguas residuales, por ejemplo la precipitación y la filtración química. Estos procesos consisten en la adición de aluminio, sales, cal y/o polímeros orgánicos con el propósito de aumentar la remoción del material coloidal, los sólidos suspendidos y el fósforo de las aguas residuales. La adición química amplifica la masa del Lodo (y usualmente también el Volumen). Las características de los Lodos químicos dependen del proceso empleado en el tratamiento de las aguas residuales. Generalmente la utilización de cal y polímeros, mejora las características de espesamiento y deshidratación (U.S. Environmental Protection Agency, 1995).

- Estimación de Producción del Lodo Terciario o químico.

La Tabla 2.2 Resume de la cantidad de Lodos terciarios que se generan.

Tabla 2.2: Cantidades de Lodos Terciarios o químicos.

Cantidad del Lodo		Humedad
m ³ /1000 m ³ de Aguas Servidas	m ³ /persona/día	%
5,12	1,9	92,5

Fuente: (Prado, 1981).

2.5.4 Producción de Lodos

La producción de Lodos depende de la procedencia o tratamiento al que fue sometido el Lodo y de que si el Lodo fue sometido o no a un tratamiento. En la Tabla 2.3 se presenta la cantidad de Lodo producido por persona y por día, la concentración de sólidos totales para cada tipo de Lodo.

Tabla 2.3: Producción y concentración de sólidos totales para distintos tipos de Lodos.

Tipo de Lodo	Producción L/persona/día	Sólidos Totales %
Crudo Primario	0,92 - 2,2	2,0 - 8,0
Digerido Primario	0,25 - 0,54	6,0 - 10,0
Crudo Activado	1,4 - 7,31	0,5 - 1,5
Crudo Primario + Activado	1,8 - 2,8	3,0 - 6,0
Digerido Primario + Activado	0,6 - 1,02	2,0 - 12,0

Fuente: (Spinosa y Vesilind, 2001)

2.6 Caracterización y Procedencia de los Lodos.

Los constituyentes del agua residual eliminados en las plantas de tratamiento incluyen basuras, arenas, espumas y Lodos. El Lodo producido en las operaciones y procesos de tratamiento de aguas residuales suele ser un líquido o líquido semisólido con un contenido en sólidos, dependiendo de las operaciones y procesos de tratamiento, variable entre 0,25 y el 12 por ciento en peso. De los constituyentes eliminados en el tratamiento, el Lodo es el de mayor volumen y su tratamiento y evacuación es uno de los problemas más complejo en la Ingeniería Ambiental o sanitaria. El Lodo está formado principalmente por las sustancias responsables del carácter desagradable de las aguas residuales no tratadas. La fracción del Lodo a evacuar (tratamiento biológico) está compuesta principalmente por la materia orgánica presente en aquella, aunque en forma diferente a la original, que también está sujeta a procesos de descomposición que la pueden hacer indeseable (Metcalf y Eddy, 1995).

La procedencia de los sólidos producidos en las plantas de tratamiento varía en función del tipo de planta. Los tipos de sólidos y Lodos generados, se indican en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Procedencia de Sólidos y Lodo.

Operación o Proceso Unitario	Tipo de Sólidos o fango	Observaciones
Desbaste	Sólidos Gruesos	Se eliminan mediante rejillas de limpieza mecánica y manual. En plantas de pequeñas dimensiones, las basuras se suelen triturar para su eliminación en los subsiguientes procesos de tratamiento.
Desarenado	Arenas y Espumas	A menudo no se incluyen instalaciones de eliminación de espumas en la eliminación de arenas.
Preaireación	Arenas y Espumas	No se incluyen instalaciones de eliminación de espumas en los tanques de preaireación. En caso de que estos tanques no vayan precedidos de instalaciones para la eliminación de arenas, se pueden producir depósitos de arena
Decantación primaria	Lodo primario y espumas	Las cantidades tanto de fango como de espumas dependen del tipo de red de alcantarillado y de la existencia de vertidos industriales.
Tanques de aireación	Sólidos suspendidos	Los sólidos suspendidos se producen por conversión de la DBO. Puede ser necesario incorporar alguna forma de espesamiento para concentrar el caudal de fango para el tratamiento biológico.
Sedimentación secundaria	Fango secundario y espumas	En la actualidad, según la EPA, es obligatoria la instalación de un sistema de eliminación de espumas en los tanques de sedimentación secundarios.
Instalaciones de tratamiento de fangos	Fangos, compostaje y cenizas.	Las características del producto final dependen de las del fango tratado y de las operaciones y procesos utilizados. Las normas que regulan la evacuación de corrientes residuales son cada vez más exigentes.

Fuente: (Metcalf y Eddy, 1995).

El Lodo se encuentra formado por sólidos suspendidos orgánicos e inorgánicos, usualmente entre un 1 y un 5%, mezclados en un líquido que contiene una considerable variedad de sólidos disueltos (Spinosa y Vesilind, 2001).

La cantidad de Lodos en exceso producidos depende de: el tipo de tratamiento de aguas residuales empleado, la aplicación y efectividad de la clarificación de las aguas residuales previo al tratamiento de lodos activados, la selección de una posible modificación al proceso o tratamiento, y la selección de los parámetros de tratamiento.

El exceso de Lodos activados es producido en la forma de un líquido que usualmente posee un porcentaje de sólidos entre 0,2 y 2 % y además contiene entre un 60 y 80% de sólidos volátiles (Ganczarczyk, 1983).

2.7 Caracterización de los Lodos

Las características de los Lodos varían en función de su origen, de la edad de éste y del tipo de proceso al cual han sido sometidos. Existen numerosos parámetros físicos, químicos y microbiológicos para caracterizar a los Lodos, entre estos se encuentran:

2.7.1 Concentración de Sólidos

2.7.1.1 Sólidos Suspendedos Totales (ST).

Una gran fracción de los componentes de los lodos es agua. Para determinar el contenido de sólidos totales, una muestra de Lodo debe ser secada a 105°C (Spinosa y Vesilind, 2001)

Los sólidos suspendidos totales se definen como aquellos sólidos que son capturados por filtración. Esta concentración es medida y expresada por porcentaje o por unidades de concentración (miligramos por litro). El procedimiento estándar para determinar la concentración de sólidos consiste en el empleo de un volumen medido y seco a un peso constante en un rango de temperatura entre 103 y 105°C, por lo tanto, la concentración de sólidos (expresada en miligramos por litro) se obtiene dividiendo la masa de los sólidos secos por el respectivo volumen de la muestra. En el caso del porcentaje de sólidos, se aplica el mismo procedimiento pero ahora se divide la masa de sólidos por la masa de la muestra (Girovich, 1996).

2.7.1.2 Sólidos Volátiles (SV).

Descritos generalmente como el contenido orgánico de sólidos en el Lodo. Para su obtención como valor, la muestra seca se quema en una mufla a 550°C. Este parámetro es usado para controlar el proceso de estabilización y estimar la producción de gas.

El porcentaje de Sólidos Volátiles presentes en la muestra se determina calentando los sólidos secos a 550°C en una caldera o mufla empleando oxígeno en exceso.

El residuo resultante de este proceso corresponde a los sólidos que no son los volátiles, es decir, los sólidos fijos, y la pérdida de peso producto del calentamiento de la muestra corresponde a los Sólidos Volátiles.

Ambos parámetros, porcentaje de Sólidos Totales y Sólidos Volátiles Totales, son ampliamente usados en el tratamiento y prácticas de manejo de Lodos, como medidas de porcentaje de humedad y material orgánico (combustible) en los Lodos (Girovich, 1996).

2.7.1.3 Contenido de Humedad.

El contenido de humedad de los Lodos es el peso del agua en una muestra de Lodo dividido por el peso total de la muestra. Esto normalmente se obtiene secando una muestra de Lodos y pesando los sólidos que quedan. El peso total de la muestra de Lodo es igual al peso del agua más el peso de los sólidos secos.

2.7.2 Presencia de agua en los Lodos

La presencia de agua en los Lodos se caracteriza usualmente como sigue (Cortez, 2003):

- Agua Libre: No se encuentra adherida a las partículas presentes en los Lodos, y puede ser separada a través de un Sedimentador Gravitatorio.
- Agua Floculada: Es atrapada dentro de los flóculos y solamente puede ser removida por fuerzas mecánicas, que usualmente son de mayor magnitud que las fuerzas gravitatorias.
- Agua Capilar: Adherida a las partículas individuales y también puede ser separada por fuerzas mecánicas.
- Agua Intracelular o ligada químicamente: Es parte del material celular y se encuentra adherida químicamente y biológicamente a las partículas orgánicas e inorgánicas de los Lodos.

2.7.3 Organismos Patógenos presentes en los Lodos.

Los cuatro mayores organismos patógenos para los seres humanos (bacterias, virus, protozoos y helmintos) pueden estar presentes en las aguas residuales domésticas. Las cantidades y especies de patógenos presentes en estas aguas residuales dependen del estado de salud de la comunidad involucrada. El nivel de patógenos presentes en el Lodo generado depende de cuán efectivo sea el tratamiento realizado a las aguas residuales. Estos patógenos son asociados a los sólidos que se presentan de manera insoluble en las aguas residuales. El tratamiento primario de aguas residuales concentra estos sólidos dentro del Lodo, así, los Lodos Primarios poseen mayor cantidad de organismos patógenos que el agua residual entrante al proceso (U.S. Environmental Protection Agency, 2003).

Los microorganismos presentes incluyen bacterias, actinomycetes, virus, helmintos (gusanos o parásitos), protozoos, rotíferos y hongos. Un limitado número de estos organismos son patógenos (provocan enfermedades). Uno de los objetivos principales del tratamiento de Lodos es la eliminación o reducción, en niveles aceptables, de los patógenos presentes. Actualmente las regulaciones o normativas mundiales no involucran a los protozoos, rotíferos y hongos en los requerimientos patogénicos debido a la carencia de métodos analíticos de determinación y a que es poco probable de que estos organismos sobrevivan a los tratamientos de las plantas de aguas residuales y al de los Lodos (Girovich, 1996).

2.7.3.1 Bacterias.

Son los organismos vivientes más pequeños. La mayoría de éstas se reproducen por división celular. Están compuestas de un 80% de agua y 20% de materia seca, de la cual el 90% es materia orgánica. Entre las bacterias más conocidas se encuentran los Coliformes Fecales, *Streptococos Fecales*, *Salmonella sp*, etc (Girovich, 1996).

Los Coliformes Fecales son habitantes inofensivos de los intestinos de los animales de sangre caliente incluyendo a los humanos. Las bacterias Coliformes viven en los materiales fecales, y coexisten con organismos que provocan enfermedades, como otras bacterias, virus y protozoos. Se hallan en concentraciones muy altas en las aguas residuales y en los Lodos, y la presencia de estos organismos en el agua y en los Lodos indican contaminación (Girovich, 1996).

En la Tabla 2.6 se encuentran los promedios típicos de la población de Coliformes presentes en los Lodos y en otros materiales.

Tabla 2.6: Promedios típicos de Coliformes presentes en ciertos materiales.

Material	Organismos/gramo, base seca
Lodos inestabilizados	$1 \cdot 10^9$
Lodos digeridos aeróbicamente	$3 \cdot 10^4 - 6 \cdot 10^6$
Heces humanas	$5 \cdot 10^{10}$
Efluentes desinfectados	$1 \cdot 10^2$
Aguas residuales	$8 \cdot 10^6$

Fuente: (Lue-Hing *et al*, 1992).

Una de las bacterias que solo habitan los intestinos de animales de sangre caliente es la *Escherichia Coli* (*E. Coli*), esto quiere decir que se puede utilizar a este organismo como un indicador de la contaminación microbiológica de los Lodos. La bacteria *Salmonella sp.* también se puede emplear como organismo indicador de la contaminación microbiológica (Girovich, 1996).

Los *Estreptococos Fecales* Incluyen los grupos de bacterias entéricos y otras especies asociadas con los desechos de animales de sangre caliente a excepción del ser humano.

Su presencia indica las causas de la contaminación humana. La razón entre *Coniforme Fecales* y *Streptococos Fecales* puede emplearse para identificar las posibles fuentes de contaminación. Para valores sobre 4,4 indica contaminación fecal producto del ser humano, pero valores menores a 0,7 representan contaminación fecal que no es provocada por el ser humano (Girovich, 1996).

Por su parte las *Bacterias Salmonella sp.* se encuentran preferentemente en Lodos no estabilizados. Estas bacterias causan varias enfermedades como gastroenteritis, fiebre tifoidea y salmonelosis. Mientras los organismos indicadores son muy útiles en evaluar la contaminación microbiológica, ningún indicador es perfecto, ya que los Coliformes por ejemplo mueren rápidamente en el agua (la edad media es de 15 horas y solo unos pocos Coliformes sobreviven más de 3 días); sin embargo, los Coliformes pueden vivir mucho más tiempo en los Lodos (Girovich, 1996).

2.7.3.2 Actinomycetes.

Gran grupo de organismos, tienen forma de células elongadas o filamentosas. Algunos de estos organismos se parecen a los hongos. Son comunes en los Lodos y en el suelo. Son saprofitos y descomponen una gran cantidad de compuestos orgánicos como las largas cadenas de hidrocarburos, compuestos aromáticos complejos, pesticidas y biomasa microbiana muerta.

También descomponen compuestos desagradables tales como los aminoácidos, azúcares y ácidos orgánicos. Generalmente crecen más lentamente que las otras bacterias. Pueden ser aeróbicos o anaeróbicos y se desarrollan en un rango de pH entre 6,0 y 8,5. A menudo son hallados en Lodos Activados y en las espumas desarrolladas en los tanques de aireación y en los estanques clarificadores secundarios. Los géneros más frecuentes reportados en los Lodos activados son los *Arthrobacter*, *Corynebacterium*, *Mycobacterium*, *Nocardia* y *Rhodococcus* (Girardi, 1990).

2.7.3.3 Virus.

Son partículas acelulares que llevan información genética de reproducción pero son incapaces de sobrevivir fuera de una célula huésped. Son extremadamente pequeños y específicos para un tipo de células. Las mayores preocupaciones en torno a los virus son su capacidad de transmitir enfermedades y las condiciones necesarias para su destrucción en los Lodos (Girovich, 1996).

2.7.3.4 Protozoos.

Son muy pequeños (5 a 1000 micrómetros). Necesitan agua para vivir, se encuentran en todas las plantas de tratamiento de aguas servidas con procesos aeróbicos. Cumplen un rol importante en los procesos de Lodos activados (sobre los 50.000 organismos/litro o cerca del 5% de los sólidos suspendidos del licor de mezcla en base seca). Estos organismos se destacan por vivir tanto de forma parasitaria como libremente. Muchos de éstos viven en los animales como parásitos. Son autótrofos, organismos saprofitos (animales que no contienen clorofila, es decir, no requieren de luz para vivir pero dependen de compuestos orgánicos solubles), fagotrofos (se alimentan de bacterias) y carnívoros (se alimentan de otros protozoos). A menudo no suelen crecer en presencia de oxígeno. Se desarrollan o viven en ambientes que presentan un pH entre 6,0 y 8,0. A pH menor a 5,0 y mayor a 8,0 la población se ve profundamente afectada. Las especies comúnmente presentes en los Lodos son las *Entamoeba histolytica* y la *Giardia lamblia*, se encuentran en climas cálidos principalmente (Girovich, 1996).

2.7.3.5 Rotíferos.

Son los organismos más simples y pequeños de los macro invertebrados presentes en las aguas residuales y Lodos. Son libres nadadores y su tamaño fluctúa entre 40 y 500 micrómetros, tienen un promedio de vida entre 6 a 45 días. Cumplen un desempeño beneficioso en los procesos de estabilización de Lodos. En los procesos de Lodos activados, los rotíferos consumen grandes cantidades de bacterias y participan en la formación de flóculos. Generalmente en los procesos aeróbicos los rotíferos contribuyen a la reducción de la DBO₅ mediante el consumo de bacterias y sólidos (Girovich, 1996).

2.7.3.6 Helmintos y Nemátodos.

Viven libremente (no necesitan de un huésped para sobrevivir), son organismos microscópicos (0,5 – 3,0 mm de largo y 0,02 – 0,05 mm de ancho) y macroscópicos (*Ascaris lumbricoides*, a veces alcanzan de 20 a 40 cm en el intestino) que incluyen a varios tipos de gusanos. Se encuentran presentes en los procesos aeróbicos donde existe la presencia abundante de oxígenos y bacterias (alimento). Algunos nemátodos sobreviven a altas temperaturas (47°C) y son tremendamente activos entre pH 3,5 a pH 9,0 (Girovich, 1996).

2.7.3.7 Fungi (Hongos).

La mayoría descomponen materia orgánica. Pueden ser ampliamente caracterizados como levaduras o moho. Los Hongos consisten en ramas filamentosas tubulares con un diámetro entre 10 a 50 micrómetros. Se reproducen a través de la formación y transmisión de esporas. Cerca de 50 especies de hongos producen enfermedades o infecciones al ser humano, afectando primordialmente a los pulmones, a la piel, al pelo y a las uñas. Son menos dependientes de la humedad que las bacterias y pueden crecer en los Lodos secos absorbiendo la humedad de la atmósfera. Pueden resistir los amplios rangos de pH y temperatura. La Tabla 2.7 muestra las enfermedades asociadas los organismos patógenos (Girovich, 1996).

Tabla 2.7: Organismos patógenos y enfermedades potenciales.

Organismo	Enfermedad	Modo de Transmisión
Bacterias y Actinomicetes		
Salmonella sp	Salmonelosis	Presencia en Agua y Lodos
Salmonella Typha	Fiebre tifoidea	Presencia en Agua y Lodos
Brucilla	Brucelosis	Presencia en Lodos
Mycobacterium tuberculosis	Tuberculosis	Presencia en Lodos
Leptospira interohaemorrhagiae	Leptospirosis	Presencia en Lodos
Escherichia Coli	Gastroenteritis	Presencia en Lodos
Clostridium tetani	Tétano	Presencia en Lodos
Nocardia sp.	Enfermedad al pulmón (Nocardiosis)	Presencia en Lodos
Acrinomyces israelí	Meningitis endocarditis Infecciones genitales	Presencia en Lodos
Campylobacter sp.	Enteritis aguda	Presencia en Lodos
Virus Entericos		
Polio virus	Poliomelitis	Presencia en Lodos
Virus	Hepatitis A	Presencia en Lodos
Coxsackievirus, echovirus	Infección leve, meningitis diarrea en infantes, enfermedades al corazón, conjuntivitis	Presencia en Agua y Lodos
Adenovirus, reovirus	Infecciones respiratorio, influenza, bronquitis, diarrea	Presencia en Agua y Lodos
Protozoos		
Cristosporidium	Gastroenteritis	Presencia en Lodos
Balantidium coli	Disentería	Presencia en Lodos
Helminfos y Nemátodos		
Ascaris Lumbricoides, ascaris scuum	Ascariasis, dolor abdominal, problemas digestivos, fiebre, dolor de pechos	Presencia en Lodos secos y húmedos
Ancylostoma duodenale, Necator amercanus	Problemas digestivos dolores abdominales	Presencia en Lodos
Trichuris trichura	trichuriasis, dolor abdominal, diarrea	Presencia en Lodos
Taenia saginato	Dolor abdominal, molestias	Presencia en Lodos
Varios trematodes	problemas intestinales, y al pulmón	Presencia en Lodos
Hongos		
Aspergillus fumigatos	Aspergillosis, infección al pulmón	Presencia en Lodos
Coccidioides immitiis, Histo-plasma capsulatum	Infección al pulmón	Presencia en Lodos

Fuente: (Girardi, 1990; Haug, 1993).

2.7.4 Composición General del Lodo

2.7.4.1 Composición Química.

Es importante considerar la composición química general del Lodo a la hora de someterlo a una serie de tratamientos biológicos, químicos y físicos para su adecuado manejo, es así como en la Tabla 2.8 se describen las principales características generales de los Lodos.

Tabla 2.8: Composición Química típica del Lodo crudo y digerido.

Características	Lodo Activado (Intervalo)	Lodo Primario crudo (Intervalo)
Sólidos Secos Totales (ST), %	0,83 - 1,16	2,0 - 8,0
Sólidos Volátiles (% de ST)	59 - 88	60 - 80
Grasas y Aceites (% de ST)		
Solubles en éter	-	6,0 - 30,0
Extractable en éter	5,0 - 12,0	7,0 - 35,0
Proteínas (% de ST)	32 - 41	20,0 - 30,0
Nitrógeno (N, % de ST)	2,4 - 5,0	1,5 - 4,0
Fósforo (P ₂ O ₅ , % de ST)	2,8 - 11	0,8 - 2,8
Potasio (K ₂ O, % de ST)	0,5 - 0,7	0 - 1,0
Celulosa (% de ST)	-	8,0 - 15,0
Hierro (no como sulfuro)	-	2,0 - 4,0
Sílice (SiO ₂ , % de ST)	-	15,0 - 20,0
Ph	6,5 - 8	5,0 - 8,0
Alcalinidad (mg/l como CaCO ₃)	580 - 1100	500 - 1500
Ácidos orgánicos (mg/l como Hac)	1100 - 1700	200 - 2000
Poder Calorífico (MJ/kg)	18500 - 23000	23000 - 29000

Fuente: (Metcalf y Eddy, 1995).

2.7.4.2 Elementos Trazas (metales pesados)

El Lodo también presenta una serie de elementos trazas que generalmente se denominan “metales pesados” cuyas concentraciones pueden variar ampliamente. En la Tabla 2.9 se presentan algunos de los contenidos típicos en Estados Unidos de metales del Lodo del agua residual.

Tabla 2.9: Contenido típico de metales en el Lodo de agua residual

Metal	Lodo Seco mg/Kg	
	Intervalo	Mediana
Arsénico	1,1 – 230	10
Cadmio	1,0 – 3410	10
Cromo	10 – 99000	500
Cobalto	1,3 – 2490	30
Cobre	84 – 17000	800
Hierro	1000 – 154000	17000
Plomo	13 – 26000	500
Manganeso	32 – 9870	260
Mercurio	0,6 – 56	6
Molibdeno	0,1 – 214	4
Níquel	2,0 – 5300	80
Selenio	1,7 – 17,2	5
Estaño	2,6 – 329	14
Cinc	101 – 49000	1700

Fuente: (U.S. Environmental Protection Agency, 1984)

2.7.5 Contenido energético de los Lodos.

Los Lodos contienen materia orgánica y, por ende, posee un valor como combustible. Éstos poseen aproximadamente 5.500 kcal/kg (10.000 BTU por libra) de sólidos volátiles secos o de 2.500 a 3.000 kcal/kg (4.500 a 5.500 BTU/libras) de materia seca total. Para hacer una comparación, el carbón tiene un contenido energético de 7.750 kcal/kg (14.000 BTU/libra) (Girovich, 1996).

El valor calorífico del Lodo Secundario residual se encuentra en función de la humedad y la composición elemental. Los principales elementos para la combustión son el carbono, hidrógeno y sulfuros. La contribución de los sulfuros al valor calorífico en los Lodos es baja. Los Lodos que contienen grandes fracciones de combustibles como las grasa y espumas, poseen un alto poder calorífico, mientras que los Lodos con alto contenido de arena o precipitadores químicos, poseen un bajo poder calorífico. El promedio del valor calorífico de los sólidos volátiles puros es aproximadamente de 23 MJ/kg (Spinosa y Vesilind, 2001).

2.8 Normativa Internacional.

2.8.1 Normativa EPA (USA).

El uso y la disposición final del Lodo es regulado en Estados Unidos bajo el Código 40 de la Regulación Federal Parte 503, con fecha 1993 (40 Code of Federal Regulation (CFR) Part 503). Estas regulaciones incluyen los requerimientos para el contenido de metales pesados, organismos patógenos y para la reducción de atracción de vectores. Describe y especifica tres clasificaciones de los Lodos. Dos de las clases (A o B) contienen las indicaciones bacterianas y/o criterios de patógenos, y la tercera clasificación calidad excepcional del Lodo que incluyen los dos requerimientos nombrados anteriormente (A ó B) (Spinosa y Vesilind, 2001).

Los Lodos Clase B son aquellos que contienen menos de 2.000.000 de coliformes fecales por gramo de sólidos en base seca. Los requerimientos de patógenos de los Lodos Clase B pueden ser conocidos mediante: el monitoreo de coliformes fecales, utilizando un proceso de reducción significativa de patógenos (PSRP) y aplicando un proceso similar al PSRP.

Ha sido demostrado que la aplicación de los procesos PSRP reducen la cantidad de coliformes fecales, entre estos se encuentran la digestión aeróbica, anaeróbica, secado al aire, compostaje y estabilización con cal (Spinosa y Vesilind, 2001).

Los Lodos Clase A son aplicados con motivos agrícolas o acondicionador de suelos, deben alcanzar los requerimientos presentados para la clasificación de Lodos Clase A. El objetivo de estos requerimientos de clasificación consiste en cumplir con lo siguiente (Spinosa y Vesilind, 2001):

- Coliformes Fecales: <1000 NMP/ 4 gr de peso seco.
- Salmonella sp.: <3 NMP / 4 gr de peso seco.
- Virus entéricos: <1 / 4 gr en peso seco.
- Ova de Helmintos: < 1 / 4 gr en peso seco.

Se Puede alcanzar la clasificación A de Lodos mediante: tratamiento térmico, aumento de pH y Temperatura, procesos destinados de reducir significativamente los patógenos presentes en el Lodo (PFRP) y otros procesos en los cuales se alcance una reducción significativa de patógenos. Los procesos que han sido certificados por la US. EPA como equivalentes a los procesos de PFRP para alcanzar los requerimientos microbiológicos de Lodos Clase A incluyen:

- a) Un proceso de estabilización de Lodos de dos etapas similar al tratamiento térmico.
- b) Un proceso de Digestión Aeróbica Modificado Termofílico.
- c) Proceso de Compostaje Modificado.
- d) Proceso Modificado de Secado de Lodo.
- e) Proceso Modificado de estabilización Alcalina.
- f) Proceso mediante Ozono.

La reducción de atracción de vectores puede ser llevada a cabo estabilizando el Lodo al punto en el cual los vectores no sean atraídos por el Lodo, y poniendo medidas de restricción al acceso del Lodo dispuesto o aplicado (Spinosa y Vesilind, 2001).

La tercera clasificación corresponde al Lodo llamado de Calidad Excepcional (Exceptional Quality Biosolids). Es el tipo de Lodo que cumple con los más exigentes límites de concentraciones de metales pesados, junto con los estándares presentes en los requerimientos de reducción de patógenos y atracción de vectores presentes en los Lodos Clase A. Esta clasificación de Lodo no está sujeta bajo el control de la regulación y puede ser aplicado directamente al suelo, vendida como compost sin restricción (Spinosa y Vesilind, 2001).

2.8.2 Normativa E.U. (European Union).

Dentro del campo de manejo de desechos o residuos, la E.U. ha promulgado una serie de directivas que constituyen las bases para el desarrollo de las regulaciones que pueden ser aplicadas para cada país miembro.

La Directiva 91/156 sobre residuos, también denominada como Directiva Base de Residuos (Waste Basis Directive) es de una significancia excepcional, incluso si es que existen otras regulaciones en el tema. Esto significa que otras regulaciones más específicas sobre el tema se aplican adicionalmente a la de la Directiva Base de Residuos. La directiva más importante concerniente a los Lodos es la Directiva 86/278 que trata sobre la protección del suelo, cuando los Lodos son usados en agricultura (Comisión de la Comunidad Europea, 1986). Todos los países miembros utilizan esta directiva como una primera etapa hacia la armonización de la utilización de los Lodos a nivel de la comunidad. La directiva contiene sólo requerimientos mínimos (Spinosa y Vesilind, 2001).

2.9 Acondicionamiento de Lodos.

El Lodo se acondiciona expresamente para mejorar sus características de deshidratación [2]. El propósito principal de acondicionar el Lodo es de aumentar la efectividad de la posterior separación sólido-líquido, esta separación puede ser llevada mediante el espesamiento o deshidratación del Lodo (Spinosa y Vesilind, 2001).

Existen dos métodos de acondicionamiento de Lodos: *Acondicionamiento Químico*, en el cual se utilizan uno o mas aditivos químicos para alterar las propiedades del Lodo, y el *Acondicionamiento Físico*, donde son utilizados parámetros como la temperatura y propiedades físicas para alterar las propiedades respectivas.

El Acondicionamiento químico es el más comúnmente usado, sin embargo, en ambos casos se altera la estructura microscópica del Lodo para que se produzca más fácilmente la separación sólido-líquido (Spinosa y Vesilind, 2001).

El deshidratado de la mayoría de los Lodos no es eficiente sin un correcto acondicionamiento, entre estos tipos de acondicionamientos se encuentran:

- Adición química de materiales orgánicos u/o inorgánicos (Acondicionamiento Químico).
- Tratamiento térmico (Acondicionamiento Físico).
- Congelamiento/Descongelamiento (Acondicionamiento Físico).
- Adición de material voluminoso.

2.10 Espesamiento de lodos

El espesado es un procedimiento que se emplea para aumentar el contenido de sólidos del Lodo por eliminación de parte de la fracción líquida del mismo (Metcalf y Eddy 1995). Se suele llevar a cabo mediante procedimientos físicos, que incluyen el espesado por gravedad, flotación, centrifugación, y filtros de banda por gravedad. La reducción del volumen del Lodo resulta beneficiosa para los procesos posteriores tales como la digestión, deshidratación, secado y combustión.

2.10.1 Procesos de Espesado

a). Espesado por Gravedad.

Se lleva a cabo en un tanque de diseño similar al de un tanque de sedimentación convencional, normalmente se emplean tanques circulares. El Lodo diluido se conduce a una cámara de alimentación central. El Lodo alimentado sedimenta y compacta, y el Lodo espesado se extrae por la parte inferior del tanque. Los mecanismos de recogida de Lodos convencionales consisten en dispositivos dotados de rascadores profundos o piquetas verticales que remueven el Lodo lentamente, promoviendo la apertura de canales para proporcionar salida al agua favoreciendo la densificación. El sobrenadante se envía para que sea nuevamente tratado en una planta de tratamiento de aguas servidas.

El Lodo espesado que se recoge del fondo del tanque se bombea a los digestores o equipos de deshidratación en función de las necesidades, por lo que, es necesario disponer de un determinado volumen de almacenamiento. En la Tabla 2.11 se indica el tipo de Lodos que es recomendable espesar con este proceso.

Tabla 2.11: Utilización del espesado por gravedad.

Método de Espesado	Tipo de Lodo	Uso y éxito obtenido
Gravedad	Primario Crudo	Utilizado a menudo, excelentes resultados
Gravedad	Primario Crudo + Lodo activado en exceso	Utilizado a menudo, resultados satisfactorios (4 al 6%)
Gravedad	Lodo activado en exceso	Poca utilización, pobres concentraciones de sólidos

Fuente: (Metcalf y Eddy, 1995).

Como se ve en la tabla, la aplicación en la que el espesado por gravedad resulta más efectivo es en el tratamiento del Lodo primario.

b). Espesado por Flotación.

Existen tres variantes básicas de este proceso: flotación por aire disuelto (comúnmente usado, introducción aire a una solución y a una presión determinada), flotación al vacío y flotación por dispersión de aire.

Cuando se despresuriza la solución el aire disuelto se libera en forma de burbujas finamente divididas que arrastran el Lodo a la superficie, desde donde es eliminado. En los lugares en los que las heladas pueden ser un problema o en los que existe preocupación por el control de olores, los espesadores por flotación se suelen construir en el interior de edificios.

La aplicación en la que el espesado por flotación resulta más efectivo, es con los Lodos en exceso de procesos de tratamiento biológicos (Lodos activados). Históricamente las concentraciones conseguidas han variado entre el 3 y el 6% en peso. El factor que más afecta en el rendimiento de estos espesadores, es la relación en peso entre el aire disponible para la flotación y los sólidos presentes en el flujo de entrada (relación aire-sólidos). La concentración de sólidos flotantes se maximiza para valores de la relación aire-sólidos entre 2 y 4. Los datos de rendimientos también indican que la concentración también disminuye para cargas de sólidos elevadas (superiores a 470 Kg/m²*día). En la Tabla 2.12 se indica el tipo de Lodos que es recomendable espesar con este proceso.

Tabla 2.12: Utilización del espesado por Flotación.

Método de Espesado	Tipo de Lodo	Uso y éxito obtenido
Flotación por aire disuelto	Lodo activado en exceso	Uso común, buenos resultados (3,5 y 5%)
Flotación por aire disuelto	Primario Crudo + Lodo activado en exceso	Uso limitado, resultados moderados

Fuente: (Metcalf y Eddy, 1995).

c). Espesado por Centrifugación.

Las centrifugas se utilizan para espesar y deshidratar Lodos. Su aplicación se suele limitar para el espesado de Lodos activados. Este proceso implica la sedimentación de las partículas de Lodo bajo la influencia de fuerzas centrífugas. Los dos principales tipos de centrifugas empleadas actualmente para el espesado de Lodos son la centrifuga de camisa maciza, y la centrifuga de cesta (Metcalf y Eddy, 1995).

La centrifuga de camisa maciza consiste en una camisa maciza dispuesta horizontalmente, con un extremo de forma troncónica. El Lodo se alimenta a la unidad de forma continua, y los sólidos se concentran en la periferia. Un tornillo helicoidal, que gira a una velocidad ligeramente distinta, desplaza el Lodo acumulado hacia el

extremo troncónico, donde se produce una concentración de sólidos adicional previamente a la descarga del Lodo.

El funcionamiento de la centrífuga de cesta es discontinuo. El Lodo líquido se introduce en una cesta que gira alrededor de un eje vertical. Los sólidos se acumulan en las paredes de la cesta produciéndose la clasificación del centrado. Cuando alcanza la velocidad de retención de sólidos de la centrífuga (normalmente entre el 60 y el 85% de la profundidad máxima de la cesta), se reduce la velocidad de giro, y se introduce un rascador para facilitar la extracción del Lodo acumulado. Esto es utilizado para sólidos finos que resultan difíciles de filtrar, o en caso en que la naturaleza de los sólidos es muy variable. En la Tabla 2.13 se indica el tipo de Lodos que es recomendable espesar con este proceso (Metcalf y Eddy, 1995).

Tabla 2.13: Utilización del espesado por Centrifugación.

Método de Espesado	Tipo de Lodo	Uso y éxito obtenido
Centrífuga de cesta	Lodo activado en exceso	Uso limitado, resultados excelentes (8 y 10%)
Centrífuga de camisa	Lodo activado en exceso	En aumento, buenos resultados (4 a 6%)

Fuente: (Metcalf y Eddy, 1995).

d). Espesado por filtros de banda por gravedad.

El origen de éstos se basa en la deshidratación de Lodos mediante filtros de banda, especialmente en el caso con contenidos de sólidos inferiores al 2%, la mayor parte del espesado se produce en la zona del filtro dedicada al drenaje por gravedad. El equipo consiste en una banda que se desplaza sobre rodillos accionados por motor de velocidad variable. El Lodo se conduce a una cámara de distribución/alimentación situada en un extremo de la unidad. Esta cámara se emplea para distribuir el Lodo uniformemente en toda la anchura de la banda móvil, mientras el agua escurre a través de la misma y el Lodo se lleva hasta el extremo de descarga. Durante el recorrido de la banda una serie de cuchillos cortan y forman surcos en el Lodo, permitiendo la liberación del agua. Una vez eliminado el Lodo espesado, la banda pasa por un ciclo de lavado. Este tipo de espesadores se ha empleado para el tratamiento de Lodos crudos y digeridos y requiere o no de la adición de polímeros. En la Tabla 2.14 se indica el tipo de Lodos que es recomendable espesar con este proceso.

Tabla 2.14: Utilización del espesado por Filtro de banda.

Método de Espesado	Tipo de Lodo	Uso y éxito obtenido
Filtro de Banda por gravedad	Lodo activado en exceso	En aumento, buenos resultados (concentraciones de Lodo entre un 3 y un 6%)

Fuente: (Metcalf y Eddy, 1995).

e). Espesadores de tambor rotativo.

Consiste en un sistema de acondicionamiento del Lodo activado (incluyendo la alimentación de polímeros), y unos tamices cilíndricos rotativos. El Lodo se mezcla con un polímero en el tambor de mezcla y acondicionamiento, y, a continuación el Lodo acondicionado pasa a una serie de tamices rotativos que separan los sólidos floculados del agua. El Lodos espesado sale por un extremo de los tambores, mientras que el agua separada se filtra a través de los tamices. Se han conseguido espesamientos del orden del 3 al 4% con la adición de polímeros. Las ventajas de este tipo de espesadores es el bajo mantenimiento necesario, el bajo consumo energético, y el reducido espacio necesario. En la Tabla 2.15 se indica el tipo de Lodos que es recomendable espesar con este proceso.

Tabla 2.15: Utilización del espesado por Tambores rotativos.

Método de Espesado	Tipo de Lodo	Uso y éxito obtenido
Tambor rotativo	Lodo activado en exceso	Uso limitado, resultados excelentes (concentraciones de Lodo entre un 5 y un 9%)

Fuente: (Metcalf y Eddy, 1995).

2.11 Procesos de Estabilización de los Lodos

El Lodo no puede ser finalmente depositado sin presentar antes algún tratamiento, esto es debido a dos limitaciones: poseen químicos y microbios que pueden ser dañinos para la salud humana y a menudo adquieren un olor desagradable.

La disposición final del Lodo en una región remota donde no se encuentra ningún ser humano es razonable en lo que a olores desagradables se refiere. Por otro lado, la disposición final del Lodo en una región urbana los olores desagradables es un gran problema. Por lo tanto el olor que genera este tipo de residuo es un criterio de

estabilidad que no debiera ser regulado cuando al hombre no lo afecta, pero si éste está involucrado a este tipo de impacto, se debiera tomar en cuenta con suma importancia (Spinosa y Vesilind, 2001).

Los objetivos principales de la estabilización son: reducir la presencia de patógenos, eliminar olores desagradables y reducir, eliminar o inhibir el potencial de descomposición del Lodo. El éxito en el cumplimiento de los objetivos nombrados anteriormente está relacionado con la estabilización sobre la fracción orgánica del Lodo (Metcalf y Eddy, 1995). Los medios de estabilización disponibles para eliminar el desarrollo de estas condiciones son:

- Estabilización Biológica (reducción biológica del contenido de materia orgánica).
- Estabilización Química (oxidación química de la materia orgánica).
- Estabilización Física o Térmica (aplicación de calor con el objeto de desinfectar o esterilizar el Lodo).

2.11.1 Estabilización Biológica

2.11.1.1 Digestión Aerobia

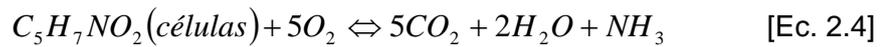
El proceso se aplica para lodos con baja concentración de sólidos y consiste básicamente en la aireación del Lodo en un tanque e involucra la oxidación directa de cualquier material biodegradable presente, formándose nuevo material celular y la posterior oxidación de parte de éste (Spinosa y Vesilind, 2001).

Muchos de los diseños actuales tienen como objetivo reducir los sólidos volátiles y así producir un Lodo estabilizado (Spinosa y Vesilind, 2001).

Este tipo de digestión sólo se puede emplear para el tratamiento de:

- Lodo activado en exceso.
- Mezcla de Lodo activado en exceso con Lodo primario.
- Lodos en exceso de sistemas de aireación prolongada.
- Lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas que no dispongan de decantación primaria.

Es similar al proceso de Lodos activados. Conforme se agota el suministro de sustrato disponible, los microorganismos empiezan a consumir su propio protoplasma para obtener la energía necesaria para las reacciones de mantenimiento celular (fase endógena). El tejido celular se oxida a CO_2 , H_2O y amoníaco por vía aerobia esto se representa en la siguiente ecuación (Spinosa y Vesilind, 2001):



En realidad solo se puede oxidar entre el 70 y 80% del tejido celular, del 20 al 30% restante está formado por componentes inertes y compuestos orgánicos no biodegradables. Mientras se desarrolla la digestión el amoníaco producido se transforma en nitrato (NO_3^-), la reacción global resultante, viene dada por (Metcalf y Eddy):



Actualmente se utilizan dos variantes del proceso suficientemente contrastadas, que son la Digestión Aerobia Convencional y la Digestión Aerobia con Oxígeno Puro.

Junto con éstas existen otras dos variantes del proceso aerobio, estas son la Digestión Aerobia Termofílica (Autothermal Thermophilic Aerobic Digestión, ATAD) y la Digestión Aerobia Criofílica. El sistema mayormente empleado es la digestión aerobia por inyección de aire (Metcalf y Eddy, 1995).

a). Digestión Aerobia Convencional.

Los factores que se consideran en este tipo de digestores son la temperatura, la reducción de sólidos, el volumen del tanque, tiempo de detención, las necesidades de oxígeno y la operación del proceso.

La temperatura del Lodo contenido en el digestor dependerá de las condiciones climáticas del lugar. Las bajas temperaturas ralentizan el proceso de digestión, mientras que con temperaturas elevadas lo aceleran, debido a que corresponde a un sistema biológico. En climas extremadamente fríos es necesario precalentar el Lodo o el aire o también cubrir los tanques.

La demanda de oxígeno que es necesario satisfacer durante el proceso es la asociada al tejido celular, el oxígeno necesario para la oxidación completa del tejido celular, es de 7 moles de O_2 por cada mol de células o aproximadamente 2,3 Kg de O_2 / Kg de células. El oxígeno residual nunca debe ser inferior a 1 mg/l (Metcalf y Eddy, 1995).

En cuanto a la operación podemos observar que el pH puede descender para tiempos de detención hidráulica elevados hasta valores bajos ($\pm 5,5$), esto es debido a

la mayor presencia de iones nitratos en solución y la reducción de la capacidad de “tampón” provocada por el arrastre con aire. A estos bajos valores de pH toma efecto la proliferación de organismos filamentosos, por lo tanto el pH se debe comprobar de forma periódica (Metcalf y Eddy, 1995).

b). Digestión Aerobia con Oxígeno Puro.

En este caso se utiliza oxígeno puro en lugar de aire. El Lodo resultante es similar al Lodo de la Digestión Aerobia Convencional. La concentración de sólidos en la alimentación varía entre el 2 y el 4%. Este tipo de digestión sirve para ser empleado en climas fríos debido a su relativa insensibilidad a los cambios de temperatura del aire ambiente gracias al aumento de la actividad biológica y a la naturaleza exotérmica del proceso. Este proceso se suele llevar a cabo en tanques cerrados aumentando la temperatura del proceso y mejorándolo a la vez. La principal desventaja de este sistema son los altos costos que se deben considerar o emplear.

c). Digestión Aerobia Termofílica (Autothermal Thermophilic Aerobic Digestión, ATAD).

La característica esencial de un ATAD es que la energía producida de la biodegradación de los sólidos volátiles es usada para aumentar en el rango termofílico la temperatura del reactor. Como en la mayoría de los sistemas biológicos, el aumento de la temperatura implica mayor tasa de reacción y en términos de ingeniería esto implica la reducción del tamaño que se requiere del reactor.

Sin embargo, las temperaturas demasiado altas inhiben la actividad biológica, quién a medida que la temperatura aumenta ésta se reduce a cero. Esto significa que la tasa crecerá hasta que la temperatura alcance los 65°C aproximadamente con lo cual se producirá una disminución hasta llegar al valor cero (Girovich, 1996).

La destrucción de los sólidos volátiles es la principal fuente de energía del proceso. La Tabla 2.17 muestra la cantidad de calor generado y el porcentaje de reducción de los sólidos volátiles en el proceso de ATAD para los Lodos.

Tabla 2.17: generación de calor y reducción de sólidos volátiles (ATAD)

Material	Calor Generado kj/kg de SV removidos	Reducción de Sólidos Volátiles %
Lodo Activado en exceso	21.000 – 23.000	25 – 40

Fuente: (Spinosa y Vesilind, 2001).

En términos generales el Lodo primario se descompone más rápidamente que el Lodo secundario reflejándose en el porcentaje de los sólidos volátiles removidos. La Tabla 2.18 muestra algunas condiciones de operación de un proceso ATAD.

Tabla 2.18: Características típicas de operación (ATAD).

Parámetro	Valor
Porcentaje de sólidos en el afluente (%)	4,0 - 6,0
Sólidos volátiles (% de sólidos secos)	60
Tiempo de retención hidráulico (días)	5,0 - 9,0
Provisión de aire (m ³ /m ³ /día)	2,0 - 4,0
Reducción de sólidos volátiles (%)	25 - 65

Fuente: (Spinosa y Vesilind, 2001).

El proceso inevitablemente produce espuma por lo tanto se debe controlar la capa de espuma que se forma a través de dispositivos mecánicos que cortan o golpean la capa de espuma.

Existen una serie de configuraciones al proceso que incluso puede abarcar hasta cuatro reactores en serie. Estas configuraciones aseguran que el Lodo sea retenido lo suficiente a una cierta temperatura para producir incluso Lodos de Clase A (clasificación hecha por la U.S. EPA), también permiten que la alimentación del sistema no necesariamente deba ser de manera continua, adecuándose a los flujos discontinuos, esto se logra mediante la utilización de un tanque que cumple la función de establecer los balances de flujos de entrada al sistema

d). Ventajas de la Digestión Aerobia.

Las principales ventajas del proceso son:

- Provee las condiciones para producir un Lodo Clase A (según las regulaciones de la U.S. EPA).
- Reduce significativamente los sólidos volátiles presentes en Lodo y de este modo alcanza el proceso de estabilización.
- El equipo mecánico es simple de mantener y operar.
- El producto obtenido adquiere condiciones de fácil operaciones de deshidratación posteriores.

e). Principales desventajas de la Digestión Aerobia.

- Los gases emitidos son muy olorosos y requieren de un posterior tratamiento antes de la ventilación del tanque.

- Los Lodos deben ser espesados entre un 4 y 6% antes de alimentar al reactor.
- Se necesita un control de la generación de espumas en el reactor.
- Para la posterior deshidratación se necesitan dosis mayores de polímeros.

2.11.1.2 Digestión Anaerobia.

Es el proceso en el cual la materia orgánica es fermentada por la acción bacteriana sin la presencia de oxígeno. Ha sido el método más usado para la estabilización del Lodo desde el siglo veinte.

Los beneficios de este proceso es que el Lodo estabilizado generado es inofensivo y presenta condiciones favorables para la posterior deshidratación, y la energía producida se encuentra de forma de biogás que tiene como constituyentes principales al metano y al dióxido de carbono (Spinosa y Vesilind, 2001).

Este proceso involucra tres grupos de bacterias. El primer grupo lo componen bacterias fermentativas (formadores de ácidos) que hidrolizan los complejos orgánicos formando compuestos solubles orgánicos más simples. Esta hidrólisis genera la formación de azúcares a partir de los carbohidratos, aminoácidos a partir de proteínas, y ácidos grasos a partir lípidos. Los compuestos orgánicos solubles son fermentados produciendo pequeños compuestos como son el formato, acetato, propionato, butirato, lactato, succinato, etanol, dióxido de carbono y gas hidrógeno (Spinosa y Vesilind, 2001). El segundo grupo de bacterias (acetogénicas) producen acetato, dióxido de carbono y gas hidrógeno a partir de los productos generados por el primer grupo de bacterias. El tercer grupo de bacterias (metanogénicas) convierten los productos intermediarios en metano y dióxido de carbono. Estas bacterias producen metano mediante dos vías, el 70% vía ruptura del acetato y el 30% restante es obtenido por el dióxido de carbono e hidrógeno. La segunda vía de obtención del metano es un factor crítico en el proceso de digestión ya que es responsable de mantener el hidrógeno y mantener la presión parcial de hidrógeno baja requerida para la producción de acetato. Si la presión parcial del hidrógeno crece, las bacterias fermentativas producirán ácidos en vez de acetatos y la conversión que realizan las bacterias acetogénicas de estos ácidos a acetato comenzará a cesar, lo que generará una menor producción de biogás ya que éste se produce mediante la ruptura de acetato. Este grupo de bacterias son sensibles ya que poseen una baja tasa de crecimiento, por ende, es importante mantener condiciones operacionales óptimas sobre todo a lo que temperatura y pH se refiere (Spinosa y Vesilind, 2001).

Las bacterias metanogénicas son anaerobias estrictas, es decir la presencia de oxígeno es tóxica para ellas, incluso el oxígeno inorgánico es perjudicial, por ejemplo la presencia de nitratos, ya que inhiben su crecimiento.

Los factores ambientales que más influyen a la actividad biológica son la temperatura, el pH, los nutrientes, los ácidos volátiles, las concentraciones tóxicas y las concentraciones de amoníaco, sulfuros, y metales pesados en el digestor. En la Tabla 2.19 se muestran las óptimas y extremas condiciones de operación del sistema.

Tabla 2.19: condiciones operacionales de la digestión anaerobia de Lodos.

Variable	Óptimo	Extremo
Ph	6,8 - 7,4	6,3 - 7,9
Potencial Oxidación-Reducción (mV)	(-) 520 a 530	(-) 490 a 550
Ácidos volátiles (mmol/l)	0,8 - 8,0	>35
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	1300 - 3000	1000 - 5000
Tasa de caga orgánica (como ácidos volátiles)		
Mesofílica (Kg/m ³ /día)	0,8 - 2,0	0,4 - 6,4
Termofílica (Kg/m ³ /día)	1,5 - 5,0	1,0 - 7,5
Temperatura		
Mesofílica (°C)	32 - 37	20 - 42
Termofílica (°C)	50 - 56	45 - 65
Tiempo de retención Hidráulico (días)	12,0 - 18,0	7,0 - 30
Composición de Biogás		
Metano (% vol)	65 - 70	60 - 75
Dióxido de carbono (% vol)	30 - 35	25 - 40

Fuente: (Spinosa y Vesilind, 2001)

a). Factores Ambientales del Proceso.

- Temperatura.

Las tasas de las reacciones químicas, bioquímicas y de crecimiento de las bacterias tienden a aumentar con la temperatura, dentro de los límites de tolerancia a ésta de los microorganismos. Muchas de las especies de bacterias responden cualitativamente de manera similar a los cambios de temperatura pero cuantitativamente de manera distinta.

Las bacterias metanogénicas son más sensibles a los cambios de temperatura que otras bacterias presentes en los digestores, esto se debe a las altas tasas de crecimiento que presentan otros grupos bacteriales, como son las bacterias fermentativas que pueden desarrollarse incluso a bajas temperaturas.

La digestión óptima ocurre a dos temperaturas distintas, una es 35°C (rango mesofílico) y la otra a 55°C (rango termofílico).

La digestión en rango termofílico ofrece mayores ventajas que la digestión en rango mesofílico que incluyen: aumenta la tasa de producción de metano, disminuye la viscosidad del fluido, disminuye la formación de biomasa, aumenta la conversión de la materia orgánica del Lodo a biogás y aumenta la inactivación de patógenos (usualmente alcanzando la clasificación de Lodos Clase A) (Spinosa y Vesilind, 2001).

- pH

La mayoría de los microorganismos crecen a un pH neutro ($\text{pH} = 7$), ya que otros valores de pH pueden alterar el equilibrio químico de las reacciones enzimáticas, llegando incluso a destruir las enzimas. Las bacterias metanogénicas son las más sensibles a los valores de pH. Si el pH se encuentra bajo 6,0, se inhibe las bacterias formadoras de metano acumulándose ácidos volátiles en el digestor. Tanto el dióxido de carbono como el amoníaco son productos de la digestión anaerobia. Mientras mayor es la concentración de bicarbonato en la solución, mayor será la resistencia ante cambios de pH.

Se puede notar que el pH de un reactor anaeróbico es determinado por la actividad metabólica de los microorganismos (quien determina la cantidad producida de dióxido de carbono, ácidos volátiles y amoníaco) como también las características físico-químicas del sistema. El cambio de pH puede ocurrir, por ejemplo, si aumenta bruscamente la tasa de alimentación al sistema y también si el sistema es sobrecargado, ya que las bacterias fermentativas crecerán más rápido que las bacterias metanogénicas y, por lo tanto, se acumularán los ácidos en el reactor (disminuyendo el pH). Otro problema operacional surge por el cambio repentino de la temperatura o la introducción de una toxina que pueden llevar a desequilibrar el sistema (Spinosa y Vesilind, 2001).

- Ácidos Volátiles.

Los efectos que producen los ácidos grasos volátiles sobre los microorganismos ya que éstos pueden afectar el pH del medio en los reactores anaerobios. Cuando el pH del medio es mantenido constante en la neutralidad, los ácidos volátiles no tienen efectos tóxicos significativos. Entre estos ácidos se ha demostrado que solo el propionato causa efectos inhibitorios y lo hace cuando presenta concentraciones mayores a 1.000 mg/l.

La concentración total de los ácidos volátiles en el Lodo digerido se encuentra en el rango entre 8 y 300 mg/l (Spinosa y Vesilind, 2001).

- Amoníaco (NH_3).

El amoníaco se forma rápidamente en el digestor por la desaminación de los constituyentes de las proteínas. El amoníaco libre es mucho más tóxico que los iones de amonio (NH_4^+), de esta manera el umbral de toxicidad del amoníaco es muy sensible a los medios de pH sobre 7. Las concentraciones del amoníaco libre y de los iones de amonio se encuentran relacionadas por las reacciones de equilibrio y por los valores de pH. Los niveles de amoníaco libre deben mantenerse bajo los 80 mg/l mientras que los iones de amonio pueden mantenerse en los 1.500 mg/l en la forma de $\text{NH}_4^+\text{-N}$. Se puede mantener concentraciones de amoníaco de 8.000 mg/l manteniendo condiciones ambientales específicas (Spinosa y Vesilind, 2001).

- Sulfuros.

Éstos son producidos en los reactores anaerobios, por la reducción de sulfatos presentes en el afluente o alimentación y también mediante la degradación de proteínas. Si la concentración de los sulfuros solubles excede a los 200 mg/l, entonces la actividad metabólica de las bacterias metanogénicas se verá fuertemente afectada seguida por un mal funcionamiento del proceso. Para reducir los sulfuros presentes, se puede agregar un metal pesado, hierro por ejemplo, ya que éstos forman precipitados con los sulfuros. Los sulfuros también están presentes en forma de gas (biogás) en el digestor. En conclusión la concentración de sulfuros solubles depende del pH de la fase líquida, de la presencia de metales pesados y de la composición de la fase gaseosa (Spinosa y Vesilind, 2001).

- Metales Pesados.

Son tóxicos en bajas concentraciones. A pesar de su toxicidad, no causan problemas en los reactores anaerobios ya que solo sus formas solubles pueden reaccionar, pero éstas disminuyen su presencia porque forman precipitados con los sulfuros. Si naturalmente la cantidad de sulfuros en el reactor es baja, se puede agregar cantidad adicional de éste a través de sulfatos ferrosos (Spinosa y Vesilind, 2001).

- Biodegradabilidad y producción de Gas (Biogás).

El método más simple de estimación de producción de biogás es a través de un balance de masa de la Demanda Química de Oxígeno (en adelante: DQO). Para el proceso anaeróbico, la DQO corresponde a un parámetro conservativo, es decir, la suma de todas las entradas de DQO al digester es igual a la suma de todas las salidas de DQO desde el digester, lo cual implica que la DQO removida en el digester (DQO de entrada menos la DQO de salida) es igual a la DQO del gas producido. La remoción de un gramo de DQO de la alimentación es igual a un gramo de biogás producido. La DQO del biogás representa la DQO del gas metano, ya que la DQO del dióxido de carbono es cero. En la Tabla 2.20 se presenta la relación entre la DQO y el volumen y la masa del gas metano (Spinosa y Vesilind, 2001).

Tabla 2.20: Coeficientes de balances entre el metano y la DQO

1 mol de CH ₄	2 moles de O ₂ 64 gr de DQO 0,0224 Nm ³
1 Kg de DQO	0,25 Kg de CH ₄ 0,35 Nm ³ CH ₄
1Kg de CH ₄	4,0 Kg de DQO 1,4 Nm ³

Fuente: (Spinosa y Vesilind, 2001).

b). Consideraciones de Diseño.

El propósito de la digestión anaeróbica es la degradación biológica de una porción de los sólidos volátiles en el Lodo para aumentar la deshidratación del Lodo digerido y a la vez minimizar su descomposición (Spinosa y Vesilind, 2001).

- Tiempo de retención Hidráulico.

El tiempo de retención hidráulico afecta la tasa y alcance de la producción de metano, quién es a la vez afectada por las condiciones ambientales dentro del tanque de digestión, la temperatura de operación, la concentración de sólidos, y el contenido de sólidos volátiles en la alimentación del Lodo. El tiempo de retención debe ser mayor al tiempo de menor crecimiento de los tipos de microorganismos presentes. Es recomendable mantener el valor del tiempo de retención dos veces mayor del tiempo de generación de las bacterias metanogénicas. El tiempo de retención dependerá de la tasa de carga de los sólidos volátiles y la cantidad de la biomasa en el reactor.

Esto significa que el límite más bajo del tiempo de retención depende del tiempo de generación de las bacterias metanogénicas y el límite más alto de la tasa de carga (Spinosa y Vesilind, 2001).

- Tasa de carga.

Se define como la masa de materia orgánica en la alimentación por unidad de volumen y por unidad de tiempo. Para el Lodo las unidades usuales que se utilizan corresponden a Kg de sólidos volátiles/m³/día. La tasa de carga se relaciona con el tiempo de retención del reactor y con la concentración de la alimentación.

En el caso de reactores sin recirculación, la tasa está relacionada con el tiempo de retención de Lodos ya que el tiempo de retención y el tiempo de retención hidráulico es el mismo. El volumen del reactor puede estimarse con la siguiente ecuación (Spinosa y Vesilind, 2001):

$$V = t \times Q \quad [\text{Ec. 2.7}]$$

Donde:

V: Volumen del reactor (m³).

t: Tiempo de retención (días).

Q: Flujo de entrada del Lodo (m³/días).

- Mezclado.

El principal objetivo del mezclado en el reactor es la eliminación, o al menos la reducción, de gradientes de aquellos parámetros que influyen las reacciones cinéticas (concentraciones microbianas, concentración de substrato, pH y temperatura). Entre las principales ventajas del mezclado incluyen:

Debido a que los reactores anaerobios son reactores cerrados y no tienen fácil acceso para su mantención durante la operación, es necesario que aquellos elementos que componen el sistema de mezclado sean equipos que no necesiten mantención periódica (Spinosa y Vesilind, 2001).

c). Ventajas del Proceso de Digestión Anaerobia.

Las principales ventajas de estos tipos de procesos son:

- Producción de Biogás: La energía producida es aún mayor que la necesaria para mantener la temperatura en los reactores, lo cual implica que la energía adicional puede ser utilizada como energía calórica y/o eléctrica.
- Reducción de la masa y el volumen del Lodo: La destrucción de los sólidos se encuentra usualmente entre el 25 y 50% de los sólidos presentes en la alimentación.
- Estabilización: El producto generado es inocuo y no emite olores desagradables pudiendo ser almacenado sin temor a la putrefacción.
- Higienización: Se inactiva significativamente a los organismos patógenos que se hallan en el Lodo.

d). Desventajas de la Digestión Anaerobia

- Relativamente alto costo de capital: Se requieren grandes tanques cubiertos, bombas para la alimentación y circulación del Lodo, intercambiadores de calor y compresores para el mezclado con gas.
- Altos tiempos de retención: Se requieren tiempos que exceden los 10 días para desarrollar y mantener las bacterias metanogénicas.
- Sobrenadante altamente contaminante.

2.11.1.3 Estabilización Química.

Los procesos de estabilización química se caracterizan por la adición de elementos químicos al Lodo para alcanzar los objetivos del proceso. La adición o aplicación de tratamientos químicos favorece su posterior manipulación. La estabilización química más usada a nivel mundial es la estabilización alcalina, existen otro tipo de estabilización química sin embargo, el enfoque se da solamente con este tipo de aplicación química (Girovich, 1996).

La estabilización alcalina puede efectuarse mediante varios tipos de químicos que son listados en la Tabla 2.21.

Tabla 2.21: Químicos usados en el tratamiento de Lodos.

Químico	Fórmula	Mayores Aplicaciones
Cal viva	CaO	Modificación de pH, control de olores, pasteurización, desinfección, estabilización, mejorar deshidratación
Cal hidratada	$Ca(OH)_2$	Modificación de pH, estabilización, acondicionamiento
Cal dolomítica	$CaO \cdot MgO$	Control de pH y olores
Permanganato de Potasio	$KMnO_4$	Control de olores (oxidante fuerte)
Cloruro férrico	$FeCl_3$	Control de olores, mejorar deshidratación
Sulfato férrico	$Fe_2(SO_4)$	Acondicionamiento, coagulación
Sulfato de aluminio	$Al_3(SO_3) \cdot 18,3H_2O$	Acondicionamiento, coagulación
Ozono	O_3 (gas)	Desinfección
Cloro	Cl_2 (gas)	Desinfección
Hipoclorito de sodio	$NaOCl$	Control de olor (oxidante)
Ácido fosfórico Ácido sulfúrico	H_2PO_4 H_2SO_4	modificación de pH en el control de olores
Polímeros y floculantes	Compuestos Orgánicos complejos	Mejorar deshidratación

Fuente: (Girovich, 1996)

La Cal y el Cloro son los compuestos mayormente usados a nivel mundial. La aplicación de cal es menos efectiva que la del cloro, sin embargo, la cal es más segura, barata y fácil de usar. El uso de cal en el tratamiento de Lodos sirve para: estabilizar los lodos, mejorar las condiciones de deshidratado y suprimir los olores desagradables (Girovich, 1996).

Generalmente existen dos tipos de procesos de estabilización con cal.

1. Estabilización con cal antes del deshidratado del Lodo, llamado *pre-estabilización con cal* y
2. Estabilización con cal después del deshidratado del Lodo, *post-estabilización con cal*.

a). Pre Estabilización con Cal

Este tratamiento es ideal para tratar cantidades moderadas de producción de Lodos. Éstos pueden ser tratados con cal viva (CaO) o hidratada ($Ca(OH)_2$) para alcanzar un $pH \geq 12$ y luego disponerlo. Esta Pre Estabilización usualmente alcanza la clasificación de Lodos Clase B (Clasificación realizada por la U.S. EPA). Algunas dosis promedio de cal para alcanzar esta clasificación se ven en la Tabla 2.22.

Tabla 2.22: Dosis de cal para alcanzar una Lodo Clase B

Tipo de Lodo	% Sólidos Totales	Libras de $Ca(OH)_2$ seca/Libra de Lodos	pH
Primario	3,0 – 6,0	0,12	12,7
Lodo Activado (Exceso)	1,0 – 1,5	0,3 – 0,38	12,6
Anaeróbico	6,0 – 7,0	0,19	12,4

Fuente: (Girovich, 1996)

El pH de los Lodos estabilizados con este proceso disminuye con el tiempo dependiendo de la dosis de cal empleada. A altas dosis (0,3 libras secas de $Ca(OH)_2$ /libra de Lodo) un pH de 12 se puede mantener durante días e incluso semanas, pero a bajas dosis (0,15 libras secas de $Ca(OH)_2$ /libra de Lodo) el pH disminuye en un par de horas. Para alcanzar las características de Lodos Clase B la U.S EPA ha desarrollado una serie de requisitos que se muestran en la Tabla 2.23.

Tabla 2.23: Requerimientos de Lodos Clase B.

Requerimientos	Estándares
Reducción de patógenos	Aumentar el pH a 12 después de 2 horas de contacto o cumplir con los estándares de coliformes fecales
Reducción de atracción de Vectores	1.- Reducir al menos el 38% de los sólidos volátiles 2.- Aumentar el pH a 12 (25°C) y mantenerlo por 2 horas. También mantener el pH a 11,5 por 22 horas o más 3.- Incorporar al suelo dentro de las 6 horas después de la aplicación

Fuente: (U.S. Environmental Protection Agency, 1995).

b). Post Estabilización con Cal.

Ha sido de gran uso por la mayoría de los países en comparación con la pre-estabilización debido a: la simplicidad de su proceso, los bajos costos asociados, la facilidad que presentan sus instalaciones. El propósito de este tipo de estabilización es el de reducir o eliminar los organismos para cumplir con los requerimientos de la reducción de atracción de vectores y minimizar los olores y enfermedades. Se ha demostrado que la post estabilización con cal es uno de los mejores procesos utilizados para reducir los patógenos como coliformes fecales, estreptococos fecales (excluyendo las ovas de helmintos) en comparación con la pre estabilización con cal, digestión anaerobia y compostaje.

Es conveniente expresar las dosis de cal teórica en toneladas de CaO por tonelada seca de sólidos. Las dosis teóricas de cal requeridas para alcanzar un pH de no menos de 12 y una temperatura de no menos de 70°C son altamente dependientes del contenido de sólidos y se encuentran en el rango de 0,3 a 2,5% (Girovich, 1996).

c). Descripción del Proceso.

Un sin número de reacciones químicas ocurren durante el proceso de estabilización alcalina. La reacción principal es cuando el calcio se oxida con agua, produciendo cal hidratada y calor (reacción exotérmica) como lo muestra la siguiente ecuación:



- 15.300 calorías/gramo/mol (a 25 °C).
- 27.500 BTU/lb/mol.
- 491 BTU/lb de cal.

La hidratación de 1 libra de cal viva (CaO) acarrea 0,32 libras de agua disponible en el Lodo produciendo 1,32 libras de cal hidratada seca. La cal hidratada se encuentra moderadamente soluble en agua y se disocia para producir un equilibrio de pH desde 11,3 a 12,53 como se muestra en la Tabla 2.24.

Tabla 2.24: Equilibrio de pH con la aplicación de cal.

CaO, gramos/litros	0,064	0,122	0,164	0,271	0,462	0,71	1,027	1,16
pH (25°C)	11,27	11,54	11,66	11,89	12,1	12,31	12,47	12,53

Fuente: (Girovich, 1996).

A 1,16 gramos/litros de solución de hidróxido de calcio es saturada a un pH de 12,53. La solubilidad de CaO decrece a medida que la temperatura crece y el pH es menor a temperaturas altas.

- Generación de calor.

La mayor reacción exotérmica es aquella donde se hidrata la cal viva para producir cal hidratada. Unos 491 BTU/libra de cal se generan dentro de los primeros 3 a 20 minutos durante el proceso de hidratación de cal viva. También se genera calor con la reacción entre la cal viva y el CO₂ que se produce en la descomposición del Lodo junto con el que se encuentra en la atmósfera. Esta reacción se puede expresar como sigue (Girovich, 1996):



- 43.300 cal/gramo/mol (a 25°C).
- 78.000 BTU/libra/mol.
- 1.393 BTU/libra de CaO.

Esta reacción entre la cal viva y el dióxido de carbono es altamente exotérmica, sin embargo ésta ocurre limitadamente ya que el CO₂ presente es mínimo. La reacción del CO₂ atmosférico con la cal viva seca trae un deterioro de la cal en el almacenamiento de ésta.

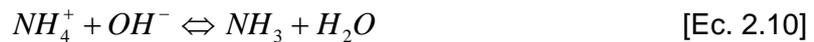
- Reacciones alcalinas.

Adicionando un compuesto alcalino como es la cal hidratada (Ca(OH)₂) se reduce la cantidad de iones libres de hidrógeno causando un aumento de pH, ya que los iones adicionales adheridos de OH⁻ se unen con los iones H⁺ presentes en la solución. La modificación de pH producto de la incorporación de la cal corresponde a un proceso de dos etapas: primero la cal viva (CaO) reacciona con el agua del Lodo para formar cal hidratada (Ca(OH)₂) y luego ésta aumenta el pH del Lodo.

Estos procesos requieren de agua, por lo tanto, si el Lodo se encuentra muy seco (> 30% de sólidos totales) se requiere mayor tiempo de retención para la hidratación de la cal. Otros factores son la reactividad y el tamaño de la partícula, ya que generalmente mientras más pequeñas las partículas se puede alcanzar mayor utilización de cal.

- Olores

Los olores presentes en los Lodos se producen en mayor medida por la descomposición de materia orgánica. Los olores constan de compuestos orgánicos e inorgánicos con contenido de nitrógeno, sulfuros y ciertos compuestos volátiles hidrocarbonatos. Los compuestos de nitrógenos en el Lodo incluyen el amonio soluble (NH_4^+), nitrógeno orgánico, nitratos y nitritos. La cantidad de nitrógeno total se puede determinar por el análisis de Kjeldahl. Los iones de amonio, en condiciones alcalinas, se convierten en gas amoniaco mediante la siguiente ecuación (Girovich, 1996):



Mientras más alto el pH, mayor cantidad de gas amoniaco (NH_3) se forma. La Figura 2.5 ilustra los efectos del pH sobre la producción de amoniaco. A pH = 11 todos los iones amonios (NH_4^+) son convertidos a gas amoniaco que si no es controlado puede producir olores desagradables.

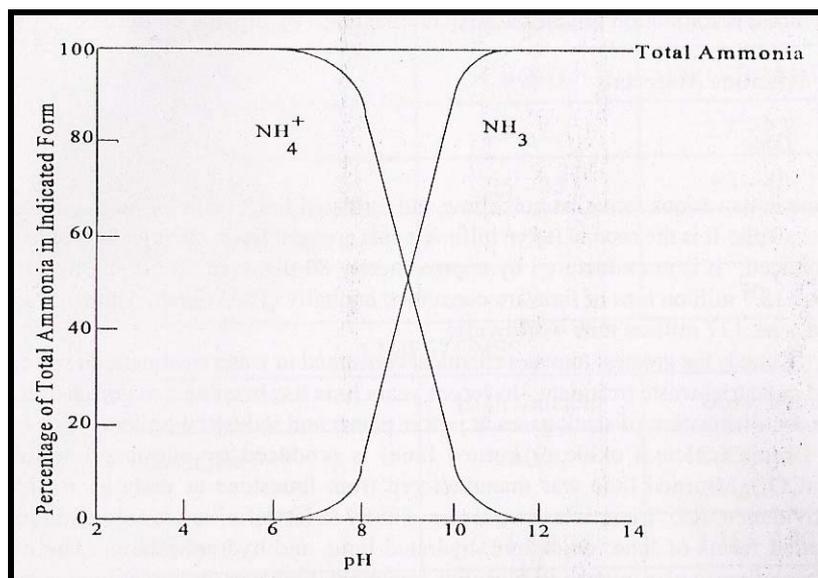


Figura 2.5: Efectos del pH sobre el comportamiento del gas amonio (Girovich, 1996).

Por otro lado los altos valores de pH eliminan los olores producidos por los sulfuros de hidrógeno (H_2S) junto con otros contaminantes que contienen sulfuros como los mercaptanos y los sulfuros orgánicos. La Figura 2.6 muestra que a medida que pH crece los gases de sulfuro de hidrógeno decrecen mientras que el ión HS^- y S^{2-} solubles en el agua crecen. A pH = 9 el sulfuro de hidrógeno (H_2S) se encuentra a 0%.

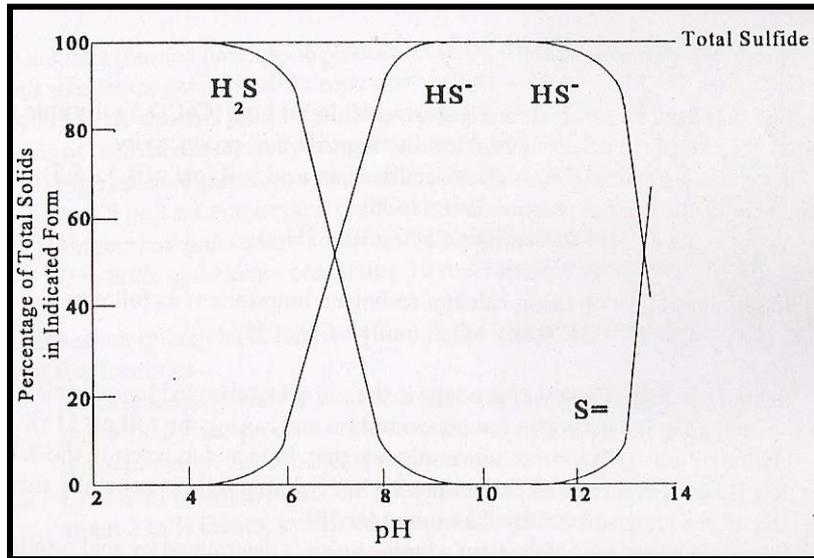


Figura 2.6: Efectos del pH sobre el comportamiento del sulfuro de hidrógeno (Girovich, 1996).

Estos fenómenos explican que la estabilización alcalina de Lodos presenta problemas de olores producto solamente del gas amoniaco ya que los otros tipos de compuestos que producen olores son eliminados (Girovich, 1996).

d). Materiales Alcalinos.

- Cal

Es producida por la quema de carbonato de calcio (CaCO_3) generándose tres formas de compuestos con cal; cal hidratada, cal viva y cal hidráulica, sin embargo, en el tratamiento de Lodos sólo interesan las formas hidratada y cal viva, pero con mayor importancia la cal viva. Varios tipos de cal son utilizados en el tratamiento de residuos sólidos para la neutralización ácida, éstos se pueden apreciar en la Tabla 2.25 (Girovich, 1996).

Tabla 2.25: Productos de cal: promedios físicos y químicos

Cal Viva		
	Alto contenido de Calcio	Dolomítica
Constituyentes Primarios	CaO	CaO y MgO
Gravedad Específica	3,2 - 3,4	3,25 - 3,45
Densidad Volumétrica (lb/pie ³)	55 - 60	55 - 60
Calor específico a 100°F (Btu/lb)	0,19	0,21
Cal Hidratada		
	Alto contenido de Calcio	Dolomítica
Constituyentes Primarios	Ca(OH) ₂	Ca(OH) ₂ + MgO
Gravedad Específica	2,3 - 2,4	2,7 - 2,9
Densidad Volumétrica (lb/pie ³)	25 - 35	30 - 40
Calor específico a 100°F (Btu/lb)	0,29	0,29
Carbonato de Calcio		
	Alto contenido de Calcio	Dolomítica
Constituyentes Primarios	CaCO ₃	CaCO ₃ y MgCO ₃
Gravedad Específica	2,65 - 2,75	2,75 - 2,9
Densidad Volumétrica (lb/pie ³)	87 - 95	87 - 95
Calor específico a 100°F (Btu/lb)	0,21	0,21

Fuente: (Girovich, 1996).

- Cal Viva (CaO).

Se obtiene mediante la quema del carbonato de calcio (CaCO₃) a temperaturas entre 2000 y 2400 °F. Resulta principalmente de la oxidación de calcio o magnesio. Sobre la base de su análisis químico, la cal viva puede dividirse en tres clases:

- Cal viva con alto contenido de calcio: contiene principalmente óxido de calcio (CaO) y solo un 5% está formado por óxido de magnesio (MgO).
- Cal viva de Magnesio: el contenido de óxido de magnesio va entre el 5 y el 35%.
- Cal viva dolomítica: contiene entre un 35 y 45% de óxido de magnesio.

Con respecto al almacenamiento de la cal viva, ésta dura mucho menos que la cal hidratada. Bajo buenas condiciones de almacenamiento la cal puede durar hasta seis meses, pero generalmente no puede ser almacenada por más de 3 meses (Girovich, 1996).

- Cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Es un polvo seco obtenido por la unión de cal viva con agua de manera de adquirir la afinidad química deseada. La cal viva con alto contenido de calcio producirá una cal hidratada con alto contenido de calcio desde un 72 a 74% de óxido de calcio y un contenido de agua que va desde 23 a 24%. La cal viva dolomítica producirá cal hidratada dolomítica también. La composición de cal hidratada dolomítica tendrá entre un 46 y 48% de óxido de calcio, entre un 33 a 34% de óxido de magnesio y entre un 15 a 17% de agua en combinación con óxido de cal (Girovich, 1996).

e). Transporte y almacenamiento de materiales alcalinos.

La principal forma de transporte de cal es del tipo transporte neumático (camión). Éstos generalmente presentan capacidades entre los 700 y 1300 pies³ (llevan cerca de 20 toneladas de cal hidratada o 24 toneladas de cal en forma de pequeñas piedras) y se cargan mediante dispositivos succionadores o bombas. El tamaño más grande de las partículas de cal hacia el camión que puede ser bombeado es de 1,25 pulgadas. Estas partículas pueden ser bombeadas como mucho por 100 pies verticalmente y 150 pies de forma vertical y horizontal combinadas. Normalmente un camión succionador puede descargar el material en aproximadamente 60 minutos.

Camiones con quinta rueda de aire también son usados para llevar cal, sobre todo cal que presente partículas finas como la cal hidratada y la cal viva pulverizada. En estos camiones la cal fluye por la aplicación de una presión baja de aire a un ligeramente inclinado canal de descarga que se encuentra al final del camión. Luego un sistema separado de transporte transfiere la cal al almacenamiento. Un ventilador separado montado sobre el camión provee el aire que se necesita para que la cal fluya.

El camión descarga la cal en una cinta transportadora que lleva el material a un estanque de almacenamiento. Estos materiales no son corrosivos y los materiales de los almacenes de cal pueden ser hechos de acero al carbón, cubos de concreto o silos (estanques de fondo cónico). En el caso de los silos, éstos deben ser cerrados o herméticos. En la Tabla 2.26 se provee de información básica para silos de 12 pies de diámetro (Girovich, 1996).

Tabla 2.26: información sobre silos de almacenamiento (12 pies de diámetro, 60% de cono).

Altura (pies)	Capacidad (pie ³)	Cal viva (toneladas)	Cal Hidratada (ton)
20	1525	40	22
25	2090	55	30
30	2650	70	38
35	3215	85	46
40	3780	100	55

Fuente: (Girovich, 1996).

La cantidad y tamaño de los silos de almacenamiento dependen de ciertos factores como el consumo diario, tipos de materiales alcalinos usados, tipo de entrega, necesidades futuras, etc.

La capacidad total de almacenamiento debe ser 50% mayor que la capacidad del camión que deposita el material para asegurar su buen funcionamiento. En el caso que exista una demanda diaria constante se debe disponer de silos de aún mayor tamaño.

La cal viva tiende a absorber la humedad presente, creando una suave capa adherente de sólidos que puede causar un efecto tipo puente en el almacenamiento. La cal hidratada generalmente forma hoyos, cráteres, debido a su esponjosa textura y posiblemente también por las cargas electrostáticas.

Debido a la resistencia que tiene la cal a la fluidez, varios métodos de diseño han sido desarrollados para facilitar la descarga de ésta. Entre estos se encuentran diseños especiales en la construcción de silos, por ejemplo, el uso de vibradores externos y plataformas de aire. Las paredes interiores del silo no deben estar pintadas y deben permanecer lisas. En algunos casos se utilizan materiales plásticos para cubrir el fondo de la tolva de almacenamiento para reducir la fricción y mejorar el escurrimiento. En cuanto a la razón Altura/diámetro, son deseables los valores entre 2,5 y 4. El fondo del silo utilizado debe tener una pendiente mínima de 60° con respecto a la horizontal, pero para el caso de la cal hidratada es conveniente que la pendiente sea aún mayor. Para mejorar el deslizamiento de la cal dentro del silo en la descarga, se pueden adjuntar vibradores electromagnéticos al exterior del silo. Estos vibradores son más adecuados para la cal viva que la hidratada ya que esta última tiende a formar "paquetes de material", de hecho con la cal viva en forma de piedras pequeñas, el vibrador puede funcionar de manera continua en el proceso de descarga.

Hay sistemas de propulsión de aire que también sirven para ayudar al deslizamiento o escurrimiento de la cal hidratada en el silo.

Normalmente la activación de aire para cal viva no es recomendada ya que ésta absorbe la humedad del aire y se convierte en cal hidratada, lo cual disminuye la propiedad original del material. Los silos deben incluir ventiladores y recolectores de polvo.

Los alimentadores de cal usualmente se ubican debajo de los silos, donde la cal fluye simplemente por la fuerza de gravedad hacia las instalaciones posteriores. En la Figura 2.7 se puede apreciar un diseño común de un silo de almacenamiento de material alcalino.

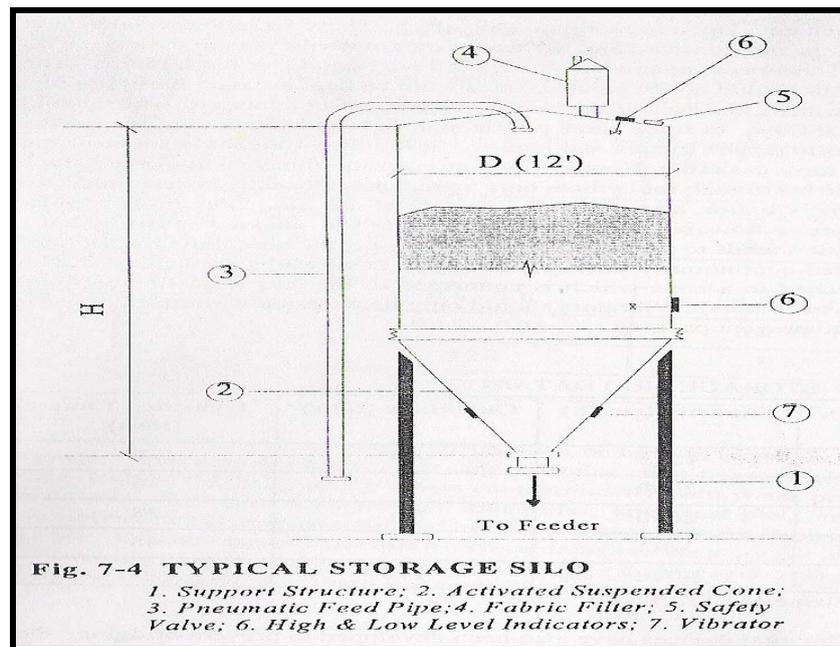


Figura 2.7: Diseño común de un silo (Girovich, 1996).

f). Procesos patentados de estabilización alcalina

Existen varios procesos de estabilización alcalina que se adecuan de acuerdo a cada tipo de necesidades de las instalaciones respectivas. De todos éstos los más importantes son:

f.1). Proceso de BIO*FIX.

Este proceso se encuentra patentado por la compañía "BIO Gro Division of Wheelabrator Clean Water Inc".

El proceso utiliza cal viva (CaO) para tratar los Lodos alcanzando los requerimientos de reducción de patógenos y vectores establecidos por la U.S. EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) a través de la U.S. EPA 503

Regulation (normativa de Lodos en Estados Unidos) para luego ser ocupados con fines benéficos. El producto obtenido por el proceso es vendido como fertilizante, sustituto agrícola, acondicionador de suelos y como material para cubrir los lugares de disposición final.

La cal (CaO) es mezclada con el Lodo proporcionalmente. La reacción exotérmica que se produce al combinar la cal con el agua presente en el Lodo, eleva la temperatura y esto combinado con un aumento de pH se produce la destrucción de patógenos y la eliminación de las propiedades de la atracción de vectores agregando suficiente cal como para aumentar el pH a 12 por 2 horas.

La razón de aplicación de cal se expresa como toneladas de cal viva por tonelada de Lodo seco. El Lodo que entra al sistema viene deshidratado, éste es transportado a un estanque de almacenamiento mediante cintas transportadoras o bombas. En el fondo del estanque se encuentra un alimentador cónico (screw feeder) que lleva el Lodo, mediante un sistema de transporte (cinta transportadora), al proceso de mezclado. La cal viva y otros materiales, son transportados por camiones y almacenados en silos. Son alimentados al mezclador mediante una serie de sistemas de transporte (cintas transportadoras de tornillo, cintas transportadoras, etc.). El producto obtenido es transportado dentro de vehículos que llevan el material a sistemas de tratamiento posteriores o a lugares de disposición final. Los sistemas de transportes (cintas transportadoras, cintas transportadoras de tornillo o hélice, etc.), los mezcladores y sitios de carga del material debieran encontrarse cerrados y manteniendo una leve presión negativa para eliminar la posibilidad de escape de olores. El aire que sale del sistema puede ser tratado por equipos de descontaminación de aire antes de ser dispuesto a la atmósfera. Un sistema lógico automático puede controlar todo el proceso (Girovich, 1996).

Las fluctuaciones en el flujo de entrada del Lodo y la humedad pueden cambiar la temperatura dentro del mezclador, parámetro esencial en el funcionamiento del sistema, por lo tanto esto se puede ajustar automáticamente. En la Tabla 2.27 se muestra información típica de una instalación con este proceso para una capacidad media del mezclador (2 toneladas secas/hora)

Tabla 2.27: Información típica de un proceso BIO*FIX

Item	Unidades	Clase A	Clase B
Capacidad de diseño	Ton seca/hora	2,0 - 2,5	4,0 - 5,0
	Ton seca/día	50 - 55	80 - 90
Producto final	Ton humeda/hora	12 - 15	20 - 25
	Ton humeda/día	280 - 300	450 - 480
Producto final secado	%Sólidos Totales	52 - 65	16 - 28
Relación de cal	Ton/Ton seca	0,8 - 2,0	0,15 - 0,3
Caballos de fuerza	Kw	65	50
Agua del proceso	Gpm	50	30
Tamaño de construcción (Largo x Ancho x Alto)	Pie	70*20*17	

Fuente: (Girovich, 1996).

➤ Control Ambiental

Este proceso se caracteriza por un aumento del pH y temperatura, lo que lleva a la formación de amonio gaseoso (NH_3^+) desde la presencia de iones amonio (NH_4^+) presentes en el Lodo. La cantidad de amonio gaseoso producido en el proceso depende de la cantidad de nitrógeno que tiene el Lodo, y de los valores de temperatura y pH que alcanza el proceso. La liberación de amoniaco ocurre principalmente en los equipos que se encuentran cerrados, esto permite que se pueda controlar la emisión de olores hacia la atmósfera. Otros componentes que causan olores desagradables son suprimidos por el aumento de pH, entre estos se encuentran el sulfuro de hidrógeno (H_2S), sulfuros orgánicos y mercaptanos. Los olores se pueden controlar mediante equipos que tratan los gases indeseados.

➤ Ventajas del proceso

- Eficiente control de calidad de las emisiones de olores.
- Inmovilización de metales pesados y reducción de sus concentraciones.
- Control automático del proceso.
- Bajo costo de capital.

➤ Desventajas del proceso.

- Aumento del volumen en el producto final (de un 15 a un 30% de peso comparado con la alimentación del proceso).

f.2). Proceso N-Viro.

Es un proceso de post estabilización alcalina que utiliza cal y polvo de horno (ya sea de cemento o de cal). El producto final se destaca por ser relativamente seco, prácticamente inodoro, y de partículas finas (Girovich, 1996).

Existen tres diferentes alternativas para operar este proceso:

- Alternativa 1: La mezcla de Lodo deshidratado, cal y polvo de horno (Kiln dust) es secado mientras el pH permanece sobre 12 por al menos 7 días. El producto debe ser mantenido por al menos 30 días y hasta que el contenido de sólidos alcance por lo menos el 65% en peso. La temperatura ambiente del aire durante los primeros 7 días de tratamiento, debe ser por sobre 5°C. Esta alternativa no es muy atractiva debido al espacio y tiempo de tratamiento que se requieren.
- Alternativa 2: La mezcla de Lodo deshidratado, cal y polvo de horno es calentado mientras el pH excede el valor de 12 usando reacciones exotérmicas que se producen por la cal viva y materiales alcalinos presentes en el polvo de horno. El material debe ser almacenado de tal manera de mantener la temperatura de 52°C por al menos 12 horas. El pulso calórico es una función del contenido de cal viva que se tenga. La variación en el contenido de cal viva en el polvo de horno requerirá de ajustes para prevenir el sobrecalentamiento u/o el bajo calentamiento en el tratamiento del producto. A continuación del pulso calórico aplicado, el producto es secado con aire (mientras el pH se mantiene sobre 12 por al menos 3 días apilando el material hasta que el contenido de sólidos sea mayor al 50% en peso. Esta alternativa no requiere de un rango de temperatura ambiente específico para operar.
- Alternativa 3: Es el mismo procedimiento de la Alternativa 2 pero en vez de apilar el material a temperatura ambiente, se ofrece como alternativa el secado térmico.

Existen más de 30 instalaciones a nivel mundial operando con este proceso, una mayoría de estas instalaciones usan la Alternativa 2 (nombrada anteriormente).

El Lodo primario, Lodo activado o Lodo digerido con un porcentaje de contenido de sólidos totales que va desde el 18 al 40%, es mezclado con cal.

El mezclador debe estar cerrado para prevenir la liberación de polvo y para permitir el posterior tratamiento del amoníaco gaseoso que produce malos olores. La tasa de aplicación de polvo de horno y cal depende del contenido de sólidos totales del Lodo alimentado y del contenido de cal viva en el polvo de horno. La cal viva es adicionada cuando la cal activada presente en el polvo de horno es insuficiente para aumentar la temperatura al nivel requerido.

El polvo de horno es un subproducto que se obtiene de la producción de cemento o cal. El polvo de horno de cemento (CKD, “cement kiln dust”) y el polvo de horno de cal (LKD, “lime kiln dust”) son ampliamente usados en el proceso. Un punto crítico del proceso es el análisis de la cantidad de cal reactiva (CaO) disponible en el polvo de horno.

Los materiales alcalinos usados en el proceso N-Viro son almacenados en silos para posteriormente ser mezclados y así alcanzar el producto final. El material alcalino es transportado desde el silo al mezclador mediante sistemas de transportes de hélices (“Screw Conveyor”) o cintas transportadoras neumáticas. Estos sistemas de transportes se encuentran cerrados para prevenir la liberación de polvo y olores (Girovich, 1996).

El material mezclado debe permanecer por 12 horas en un contenedor generador de calor, en un compartimiento de almacenamiento o en pilas cubiertas o cerradas mientras la temperatura se mantiene por sobre los 52°C y bajo los 62°C (pasteurización). Después de la aplicación de calor, el material es descargado en pilas formando una hilera. El material es aireado y es revuelto intermitentemente de 3 a 7 días y se encuentra terminado cuando el contenido de sólido se ubica entre los 60 a 65%, mientras el pH permanece sobre 12. Las propiedades generales de este proceso se pueden listar en la Tabla 2.28.

Tabla 2.28: Propiedades del producto del proceso N-Viro

Ítem	Información
Sólidos totales, % en peso	50 – 60
Sólidos volátiles totales, % en peso	9,3
Nitrógeno Total, % en base seca	1 – 1,5
Fósforo, P, % en peso	0,39
Potasio, K, % en peso	1,0
Ca, % en peso	20
Mg, % en peso	1
Na, % en peso	0,2
CaCO ₃ Equivalente, %	50 – 80
Contenido de CKD, % en peso	35
Ph	11,0 - 12,0
Densidad Volumétrica, lb/pie ³	50 – 62
Aplicación	Como cubierta de suelos

Fuente: (Girovich, 1996).

- Ventajas del proceso N-Viro.
 - Producto estable y de buena calidad.
 - Inmovilización de metales pesados.
 - Relativamente bajos costos operacionales.

- Desventajas del proceso N-Viro.
 - Aumento del volumen y peso del producto entre un 50 a 70% en peso comparado con el Lodo de entrada.
 - Alta necesidad de espacio para el apilamiento y secado al aire.
 - El control de olores es caro.
 - El control de la temperatura es manual y se necesitan ajustes en base a la alimentación alcalina.
 - Relativamente altos costos de capital.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

a) Diagnóstico

El diagnóstico del actual manejo de lodos de la Empresa, se realizó considerando cuatro temas claves. Estos son:

- Descripción y características del funcionamiento de las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas presentes en la Empresa.

Se acudió a la información presente en los manuales de construcción y operación de las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas así como a los permisos emitidos por el Servicio Regional de Salud de Antofagasta.

- Construcción y operación del sistema de disposición final de los Lodos.

Indagación en el proyecto de construcción y operación del sistema de disposición final de los Lodos, en los permisos emitidos por el Servicio Regional de Salud de Antofagasta y los registros que brindó la Empresa contratista encargada del manejo de este tipo de Residuos.

- Propiedades y características Físico-Químicas del Lodo.

Para caracterizar al tipo de Lodo que se genera en las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas, se hizo un análisis de laboratorio (Universidad Católica del Norte) considerando la Densidad, los Sólidos Volátiles, Sólidos Totales y el Porcentaje de Humedad en peso del Lodo Secundario residual. A partir de estos datos, se obtuvieron otros resultados que sirvieron para el desarrollo de la propuesta como son la masa y volumen de lodo generado en la Empresa de acuerdo a los registros respectivos.

- Meteorología de los terrenos donde se encuentra ubicada la operación de la Empresa.

Aquí se incorporó la información que proporcionan las estaciones de monitoreos presentes en las inmediaciones de la faena minera.

Esta estación de monitoreo es operada por una Empresa contratista, la cual entrega un informe mensual con todos los monitoreos meteorológicos realizados por la respectiva estación meteorológica. En éstos se incluyen los principales registros o monitoreos como son la evaporación, precipitación, temperatura máxima y mínima, etc.

b) Estudio Legal del Manejo de Lodos.

Se consiguió el nuevo Reglamento para el Manejo de Lodos Generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas que en este momento se encuentra en la Contraloría de la República afinando los detalles legales para su posterior implementación. Con este Reglamento se consiguieron todos los requerimientos técnicos y operacionales que aplicaban a la Empresa.

Se plasmaron todos los requisitos y requerimientos que la Empresa debería cumplir una vez publicado el Reglamento. También se analizaron los requisitos de la normativa actual (Chilena) sobre el manejo de Lodos.

c) Análisis y Selección de Alternativas

Para la selección de las alternativas a analizar se basó en los criterios relacionados con: el Plan Estratégico de la Compañía, el pronunciamiento de la Superintendencia de Medio Ambiente y los requisitos legales técnicos y operacionales involucrados con la situación actual del manejo del residuo.

Las alternativas seleccionadas para el análisis fueron la Estabilización Aerobia, Anaerobia y Alcalina, considerando sus respectivas características operacionales.

Para la evaluación se compararon las alternativas seleccionados de acuerdo a los siguientes parámetros:

- Cumplimiento Legal.
- Impacto Ambiental.
- Características Operacionales.
- Equipos o Dispositivos del Proceso.

A partir de estos parámetros, apoyándose en el Marco Teórico desarrollado, se obtuvo el número de ventajas y desventajas de cada proceso. Considerando lo anterior se realizó la selección más adecuada para el tratamiento del Lodo Secundario

d) Elaboración de la Propuesta

Para la elaboración de la propuesta, se consideró el resultado obtenido de la selección de la mejor alternativa de tratamiento de Lodos Secundarios residuales.

Se establecieron los parámetros o aspectos principales del proceso a proponer, delineando lo que son las materias primas de entrada al proceso, así como el análisis de los requerimientos de cada Elemento contenido en éste.

Se diagramó el proceso de acuerdo a los requerimientos técnicos legales y operacionales aplicados a la empresa.

e) Balance de Masa

Para el Balance de Masa se dividió el proceso propuesto en tres grandes clasificaciones, Línea de Lodo, Línea de Cal y Tratamiento Alternativo. Para cada uno de éstos, se definieron los Elementos más relevantes que participan en cada clasificación. Para cada Elemento se consideraron los flujos de entrada y salida con respecto a las propiedades de los materiales que entran y salen del proceso, diagramando en forma individual lo estipulado anteriormente.

Luego de esto se procedió a realizar un esquema del Balance de Masa obtenido para cada Elemento, de forma consolidada de acuerdo al diagrama obtenido en la elaboración de la propuesta.

f) Evaluación Económica de la Propuesta

Para esto se desarrolló solo un esbozo de los costos asociados al proyecto considerando dos temas principales que fueron la Inversión Inicial y los Costos Operacionales.

La inversión Inicial proviene de los requerimientos de la compra de Equipos y requerimientos de Obras físicas y otros que necesita la propuesta y los costos operacionales se obtuvieron de acuerdo al análisis de operación de 5 años del proyecto a partir de la instalación.

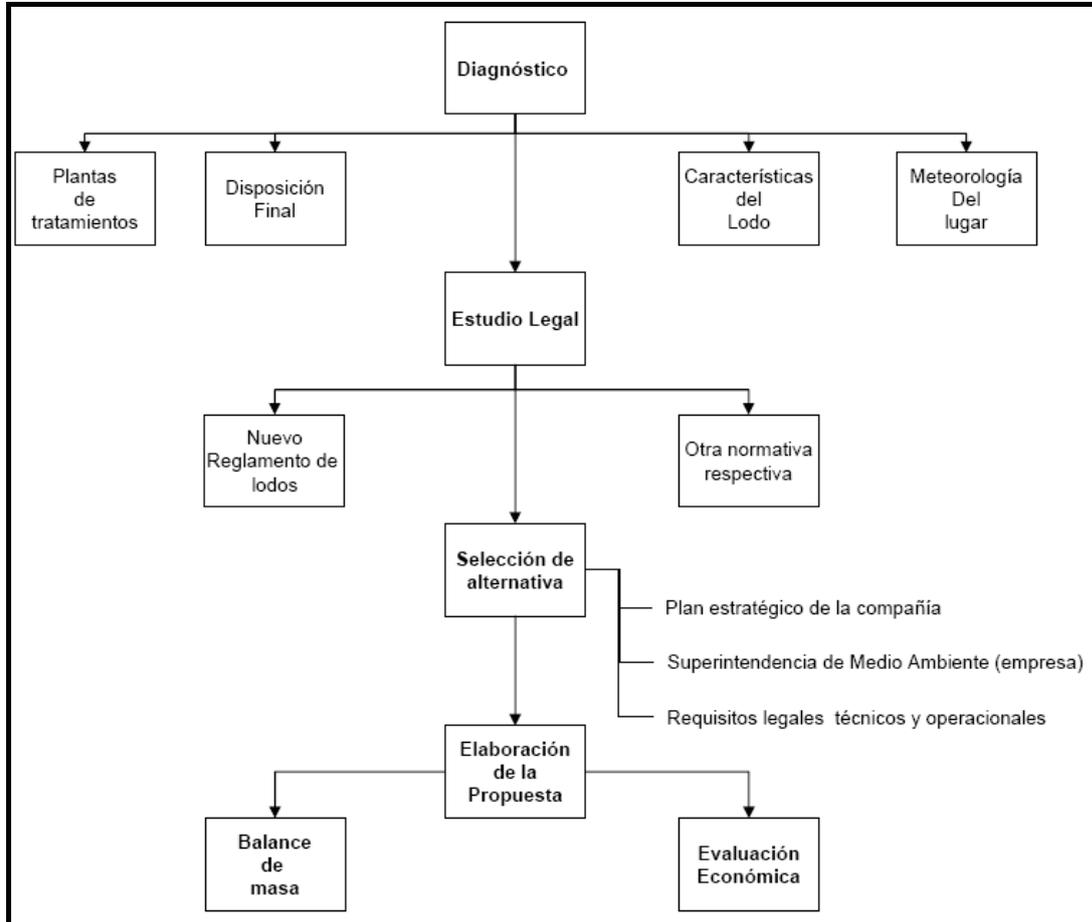


Figura 3.1: Esquema de Metodología Empleada.

CAPÍTULO 4 SITUACIÓN ACTUAL DE LA EMPRESA

4.1 Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas de la Empresa.

La Empresa se encuentra a cargo de 4 Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (en adelante PTAS) las cuales operan a través del proceso biológico de Lodos Activados modelación Aireación Extendida. Estas 4 plantas corresponden a:

- PTAS Villa San Lorenzo.
- PTAS Campamento 2000.
- PTAS Laguna Seca (LA-150).
- PTAS Campamento 5400.

4.1.1 Introducción al Sistema de Tratamiento de las PTAS.

La Tecnología utilizada por las PTAS corresponde a un tratamiento biológico del tipo Lodos Activados modalidad de Aireación Extendida. La operación de una Planta que presenta este proceso puede ser comparada a la de cualquier proceso de fabricación. El agua cruda y el oxígeno del aire son los insumos; los motores eléctricos, la fuente de poder; el efluente claro y puro, el producto; el lodo digerido, el subproducto.

El proceso consiste en mezclar el Lodo Activado con el agua servida cruda recién ingresada, airear la mezcla por un periodo de tiempo respectivo (depende de cada planta), separar el Lodo del líquido por sedimentación, y retornarlo al proceso de aireación. Durante el periodo de aireación se lleva a cabo el tratamiento biológico del agua servida. Las impurezas que vienen con ella son absorbidas en la superficie de los flóculos formados, donde las bacterias y otros microorganismos se alimentan. Al final del periodo de aireación el líquido de mezcla fluye desde los estanques de aireación a los sedimentadores finales.

Una vez allí, los flóculos o partículas de lodos decantan al fondo de los estanques, dejando que el líquido claro salga fuera por el vertedero final superior. Los Lodos Activados que sedimentan en el fondo son continuamente bombeados de vuelta a la etapa de Aireación, para ser mezclados con el agua servida cruda nuevamente. Los Lodos Activados que son bombeados desde los estanques de Sedimentación se denominan Lodos Retornados, en cambio los Lodos que son sacados del sistema de tratamiento son denominados Lodos en Exceso.

Debido al tamaño de los microorganismos, siempre sale una porción de ellos en el agua clarificada. Para evitar contagios o epidemias en los cuerpos receptores del agua tratada, usualmente el agua clarificada es desinfectada a través de la adición de Hipoclorito de Sodio.

4.1.2 Descripción del proceso de Tratamiento de las PTAS.

Los procesos de las Plantas constan con las siguientes etapas o características:

- a) Desbaste de Materias gruesas.
- b) Aireación.
- c) Sedimentación.
- d) Desinfección.
- e) Digestión de Lodos.

Las plantas están compuestas de un estanque de concreto único de proceso , separado en compartimientos que cumplen distintas funciones, y de equipos para la distribución de aire, la recirculación de lodos, el control de la operación y la limpieza de la planta. Es en el estanque de proceso donde ocurre la depuración de las aguas servidas. El tratamiento completo ocurre mediante las siguientes etapas:

4.1.2.1 Primera Etapa: El agua cruda entra a la planta a través de una cañería en cuyo extremo se ubica una reja estática de paso que permite atrapar las materias gruesas.

4.1.2.2 Segunda Etapa: El agua, libre de sólidos gruesos, ingresa al compartimiento de Aireación, en él se desarrolla una población de bacterias que se alimentan de la materia orgánica, transformándola en productos no contaminados. En esta etapa se agrega aire limpio a través de sopladores tipo Roots (que depende de cada PTAS) y un manifold dotado con difusores de burbuja fina instalados en el fondo del compartimiento, los que permiten una adecuada transferencia de oxígeno.

4.1.2.3 Tercera Etapa: Aquí ocurre la Sedimentación que separa por decantación los sólidos suspendidos que floculan en la etapa de Aireación. El agua Clarificada sale del Sedimentador por la zona superior. Los lodos acumulados en el fondo del Sedimentador, son retornados al compartimiento de Aireación para mantener una alta población microbiana.

4.1.2.4 Cuarta Etapa: El agua clarificada pasa gravitacionalmente al compartimiento de desinfección, donde se elimina el remanente de bacterias y virus para cumplir con la norma asociada al efluente de las PTAS según su posterior uso (Norma Chilena 1333 of 78. Esta norma es de riego, sin embargo en la Resolución emitida por el Servicio de Salud de la II región, se señala que como el agua clarificada va a ser infiltrada al suelo, la Empresa debiera cumplir con la NCh 1333/78). La desinfección se realiza con Hipoclorito de Sodio, dosificado a través de un sistema de contacto entre pastillas de Hipoclorito y el flujo de agua que circula por el estanque, o por una bomba dosificadora montada sobre un estanque de acumulación, donde es preparado en dilución. Se incluye también un sistema de decloración que permite asegurar la absoluta ausencia de cloro en exceso. El sistema consiste en la dosificación de Sulfito de Sodio o Bisulfito de Sodio, mediante los sistemas idénticos usados para la cloración.

4.1.2.5 Quinta Etapa: Los lodos en excesos son desviados hacia el compartimiento de espesado con aire y digestión aeróbica, donde son acumulados y estabilizados. Este compartimiento está dotado de difusores de membrana de burbuja fina, montados en un manifold que se encuentra fijo al fondo del estanque.

4.1.2.6 Sistema de proporción de Aire a la PTAS.

El aire que requiere la Planta proviene del grupo motobomba de aire, conectado al manifold, y este incluye: un motor eléctrico, un soplador de aire tipo Roots, un sistema de acople por correas, base y cubierta protectora y anti sonora, válvula de retención, válvula de seguridad, válvula de corte de bola, conector flexible y gomas de anclaje para absorber vibraciones. Todo el control y la fuerza eléctrica requerida por el grupo motobomba de aire y las bombas dosificadoras son realizadas desde el tablero eléctrico, que incluye un interruptor y partidor general para los grupos motobomba de aire y bomba dosificadora; luces de operación y falla; selección manual del grupo de motobomba de aire a operar; selección operación Automática/Manual para el grupo motobomba de aire en operación.

En la Figura 4.1 se presenta un resumen del tratamiento utilizado en cada PTAS de Minera Escondida Limitada.

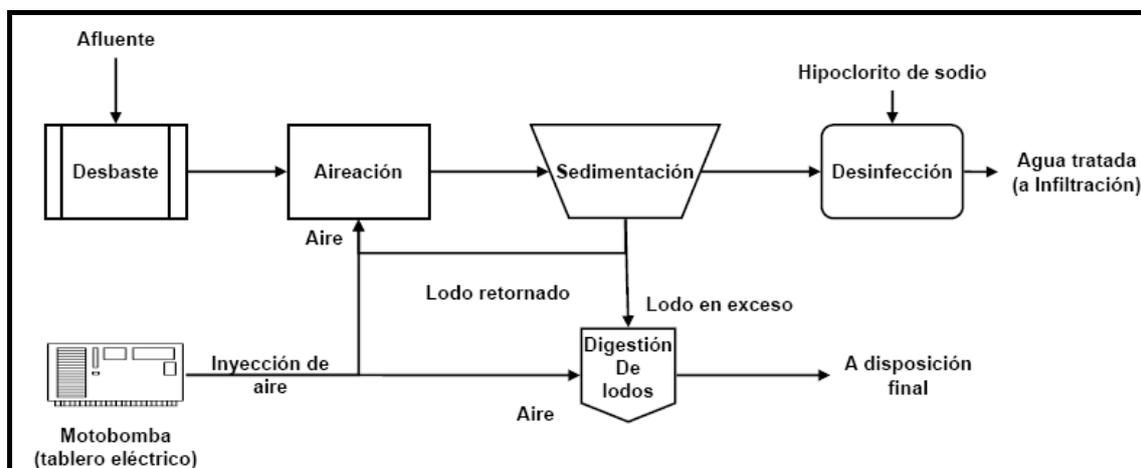


Figura 4.1: Plantas de Tratamiento de Minera Escondida Limitada (Minera Escondida).

4.1.3 Características generales de las Plantas.

Las 4 plantas de tratamiento funcionan de la misma manera (ver Figura 4.1), es decir, operan mediante un proceso biológico de Lodos Activados modelación aireación extendida, en la Tabla 4.1 se observan las características principales de cada una de ellas.

Tabla 4.1: Características de las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas.

Parámetro	Unidad	Campamento			
		2000	5400	Villa San Lorenzo	LA-150
Nº Líneas de Tratamiento	Nº	4	2	4	1
Capacidad de Tratamiento	m ³ /día	720	801	890	40
Capacidad de Tratamiento	Nº Personas	4000	5340	4105	200
Promedio de Tratamiento Actual	Nº Personas	1967	5340	1115	150

Fuente: Registros Minera Escondida Limitada.

4.2 Producción de Lodos Secundarios.

Con respecto a los Lodos Primarios, la cantidad generada es menor y por lo tanto es enviada a Antofagasta como residuo orgánico junto con otros residuos. Los Lodos Secundarios provenientes de las Plantas de Tratamiento de Aguas, se almacenan por un período de no más de 4 días en un digestor de Lodos presente cada planta, cuya función es estabilizar aeróbicamente el Lodo en exceso.

4.2.1 Cantidad Estimada de Lodo Secundario generado.

La cantidad de Lodo Secundario generado se da conforme al retiro de las distintas plantas de tratamiento presentes, esto genera un promedio mensual de 301 m³ de Lodos obtenidos del proceso de Lodos Activados. En la Tabla 4.2 se presentan los valores de generación por planta de tratamiento.

Tabla 4.2: Valores de producción de Lodos secundarios en exceso crudos por Planta de Tratamiento de Agua.

Parámetro	Unidad	Campamento				Total
		2000	5400	Villa San Lorenzo	LA-150	
Promedio Mensual	m ³ /mes	83,6	47,3	158,5	12	301,4
Promedio Semanal	m ³ /semana	20,9	11,8	39,6	3	75,3
Promedio Diario	m ³ /día	3,0	1,69	5,7	0,43	10,8

Fuente: Registros Minera Escondida Limitada.

4.3 Características del Lodo Secundario.

El Lodo proviene de las plantas de tratamiento de aguas servidas presentes dentro de las instalaciones de la concesión minera. Las propiedades o características que presentan los Lodos se obtuvieron de acuerdo a un examen de laboratorio (laboratorio del departamento de Ingeniería Química de la Universidad Católica del Norte) realizado al Lodo Secundario generado en la planta de tratamiento (específicamente extraído del digestor de Lodos) del Campamento Villa San Lorenzo, por lo tanto, se podría tratar como Lodo Secundario equivalente. Los parámetros a medir fueron:

- Sólidos Suspendidos Totales (SST).
- Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV).
- Porcentaje de humedad.
- Densidad del Lodo.
- Otras características de interés.

4.3.1 Sólidos Suspendidos Totales (SST).

Para la obtención de este valor se realizaron dos mediciones en el Laboratorio de ingeniería con el objetivo de que el valor pudiera ser más preciso y fidedigno.

Tabla 4.3: Resultados, ST (mg/l).

V[ml]	Masa crisol [gr]	Masa salida horno[gr]	ST mg/l	ST Promedio (mg/l)
10	15,0125	15,1649	15240	15015
10	12,2697	12,4176	14790	

Fuente: Departamento Ingeniería Química de la Universidad Católica del Norte.

4.3.2 Sólidos Suspendidos Volátiles (SV).

Al igual que la metodología empleada para los ST, se efectuaron dos mediciones (réplica).

Tabla 4.4: Resultados, SSV (mg/l)

V[ml]	Masa 1 [gr]	Masa 2 [gr]	SSV (mg/l)	Promedio SSV (mg/l)
10	14,6107	14,4787	13200	13280
10	13,1099	12,9763	13360	

Fuente: Departamento Ingeniería Química de la Universidad Católica del Norte.

4.3.3 Porcentaje de Humedad en peso(%)

Siguiendo con la misma metodología efectuada para los ST y los SV.

Tabla 4.5: Resultados, % en peso de Humedad.

V[ml]	Peso crisol [gr]	Peso crisol+volumen	Peso 2 [gr]	Peso del volumen (gr)	Peso de los sólidos (gr)	% de sólidos	% humedad
10	14,1382	24,0417	14,2907	9,90	0,1525	1,540	98,460
10	39,8586	49,5569	40,0027	9,70	0,1441	1,486	98,514
Promedio				9,80	0,15	1,51	98,49

Fuente: Departamento Ingeniería Química de la Universidad Católica del Norte.

4.3.4 Densidad.

Tabla 4.6: Resultados, Densidad (masa/volumen).

V(ml)	Masa Crisol (gr)	Masa Crisol + V (gr)	Densidad (Kg/m ³)
100	92,886	184,73	918,44

Fuente: Departamento Ingeniería Química de la Universidad Católica del Norte.

4.3.5 Otras características de interés.

Existen otras características del Lodo Secundario que se pudieron obtener a partir de los resultados nombrados anteriormente y de la bibliografía asociada. Éstos se pueden observar en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Resultados, Otras características de interés.

Parámetro	Valor	Tipo de Dato
Masa del Lodo (kg/mes)	276.318	Calculo
Masa de Agua en el lodo (kg/mes)	272146	Calculo
Masa de Sólidos del lodo (kg/mes)	4.172	Calculo
Volumen de Agua del lodo (m ³ /mes)	272,15	Calculo
Volumen de sólidos del lodo (m ³ /mes)	4.55	Calculo
Densidad del Lodo (kg/m ³)	918	Laboratorio
Densidad del Agua a 14°C (kg/m ³)	1.000	Dato
% de Humedad del lodo en Peso	98,49	Laboratorio
% de Sólidos del lodo en peso	1,51	Laboratorio
ST (mg/l)	15.015	Laboratorio
SV (mg/l)	13.280	Laboratorio
Sólidos Fijos (mg/l)	1.735	Cálculo
pH del Lodo	7	Laboratorio
Producción del Lodo (m ³ /mes)	301	Dato

Fuentes: [2], Resultados de Laboratorio.

4.4 Tratamiento de Lodos Secundarios.

El tratamiento que actualmente se lleva a cabo tiene por objeto estabilizar el Lodo mediante Digestión Aerobia y deshidratarlo por medio de canchas de secado, para disminuir o eliminar; la materia orgánica (Sólidos Suspendidos Volátiles), organismos patógenos y agua presente en el residuo.

4.4.1 Digestión Aerobia.

Tal como se menciona anteriormente, el Lodo Secundario residual es llevado a un digester de Lodos ubicado en las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas de la empresa. Este digester tiene forma rectangular, y trata el Lodo Secundario residual mediante una Digestión Aerobia. Para esto el Lodo Secundario residual permanece por no más de cuatro días, sin inyección de aire, para luego ser retirado por camiones cerrados con capacidad de llevar 9 m³ de Lodo.

4.4.1.1 Condiciones Operacionales.

El tratamiento de Lodo Secundario no cumple con las condiciones operacionales bibliográficas, ya que para estabilizar el Lodo Activado en exceso se deben seguir condiciones operacionales mínimas, en el Tabla 4.8 se presenta una comparación de las características operacionales actuales y las condiciones operacionales mínimas para poder estabilizar mediante Digestión Aerobia los Lodos, de acuerdo a la bibliografía asociada.

Tabla 4.8: Características operacionales llevan a una no conformidad operacional.

Parámetro	Características Operacionales Actuales	Condiciones Operacionales Óptimas
Tiempo de Retención Hidráulico	Cuatro días	Entre diez y quince días
Inyección de Aire	Sin Inyección de Aire	de 1,2 a 2,5 m ³ de aire/m ³ de Lodo*hora

Fuente: Manual de Procedimientos de Minera Escondida Limitada.

Por lo tanto se puede ver que las condiciones operacionales mínimas que debe tener el tratamiento de Lodos Secundarios mediante un proceso de Digestión Aerobia, no se cumplen, lo cual trae consigo una no conformidad operacional.

4.4.2 Deshidratación de Lodos Secundarios.

Una segunda parte del tratamiento de Lodos que se emplea en la Empresa, es la Deshidratación en canchas de secado, ésta se lleva a cabo en el lugar de Disposición Final, mediante la construcción de trincheras de infiltración donde son depositados los Lodos Secundarios para su posterior deshidratación mediante evaporación e infiltración de agua.

4.5 Disposición Final de Lodos Secundarios.

Una vez retirados los Lodos secundarios de los digestores ubicados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas de la empresa, es transportado por medio de un camión succionador a un Mono Relleno compuesto de trincheras de infiltración ubicadas en un lugar apartado al norte de la explotación pero dentro de la concesión minera.

4.5.1 Mono Relleno, Trincheras de Infiltración.

Minera Escondida posee de un sistema de Mono Rellenos para la disposición final de los residuos orgánicos provenientes de las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas que se generan en la operación. Este sistema de disposición final cuenta con la autorización del Servicio de Salud de la Segunda Región de Antofagasta mediante las Resoluciones Sanitarias respectivas.

4.5.1.1 Características del sistema de Disposición Final o Mono Rellenos.

- N° de Trincheras Construidas: 45
- N° de Trincheras Operativas: 37
- Medidas de cada Trinchera: largo 10 m; ancho 3 m; alto 2,5 m.
- Capacidad de cada Trinchera: 75 m³.
- Superficie de terreno de Mono Relleno: 10.000 m².
- Cierre perimetral de Terreno de Disposición: 400 m lineales.

4.5.1.2 Capacidad actual del Sistema de Disposición Final de Lodos o Trincheras.

En este momento se está depositando la cantidad de 301 m³/mes de lodos en el sistema de disposición final de residuos, teniendo una vida útil de 1 año más a partir de mayo del 2006, la capacidad ocupada de las trincheras es de alrededor del 96%.

4.6 Impactos Ambientales Identificados en el Tratamiento y Disposición Final de Lodos.

Se encuentra que el Sistema de disposición de lodos en trincheras de infiltración produce 2 impactos ambientales no menores; estos son:

- Generación de Olores desagradables y dañinos.
- Infiltración de agua contaminada al subsuelo.

4.6.1 Generación de Olores.

La generación de olores viene dada ya que los Lodos Secundarios no son estabilizados correctamente, debido a que los digestores de Lodos ubicados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas no operan con las condiciones mínimas que se requiere para disminuir o eliminar la materia orgánica y organismos patógenos presentes en los Lodos Secundarios.

Los olores se generan en base a la descomposición de materia orgánica y a la muerte celular de los organismos patógenos generando gases como NH_3 , H_2S , CH_4 y otros.

4.6.2 Infiltración de agua contaminada al subsuelo.

Una vez que el Lodo es depositado en las trincheras de infiltración, éste debiera secarse producto del evento físico de evaporación. En la Figura 4.2 se muestran los registros de evaporación obtenidos de la Estación meteorológica Cerro Marcelo de Minera Escondida Limitada.

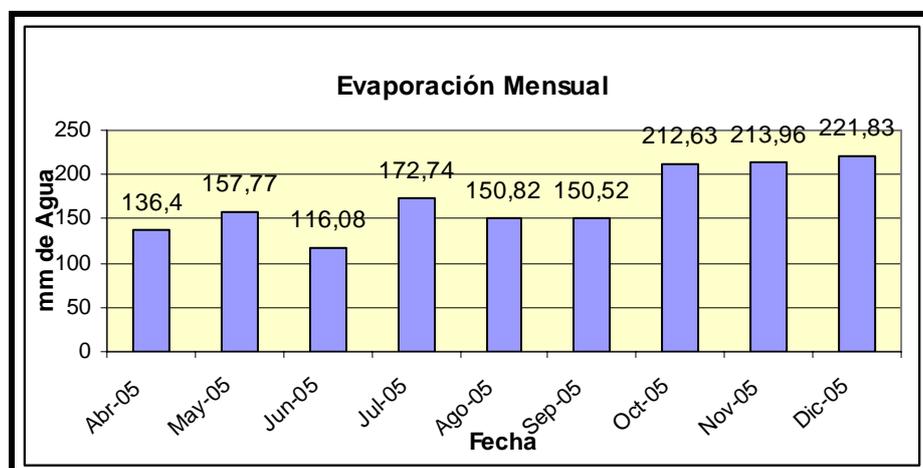


Figura 4.2: Evaporación en el Lugar de Disposición Final (Minera Escondida).

La cantidad de agua presente en el Lodo Secundario depositado en las trincheras de infiltración corresponde a 271 m³/mes. En la Tabla 4.10 se muestra el porcentaje de esta agua que es evaporada.

Tabla 4.10: Cantidad y porcentaje de agua Evaporada del Lodo.

Fecha	Evaporación Promedio por Trinchera	N° de Trincheras	Evaporación Total Trincheras	Porcentaje de Agua en el Lodo que es evaporada
	M ³ /mes	N°	m ³ /mes	m ³ /mes
Abr-05	4,092	37	151,404	56%
May-05	4,7331	37	175,1247	65%
Jun-05	3,4824	37	128,8488	48%
Jul-05	5,1822	37	191,7414	71%
Ago-05	4,5246	37	167,4102	62%
Sep-05	4,5156	37	167,0772	62%
Oct-05	6,3789	37	236,0193	87%
Nov-05	6,4188	37	237,4956	88%
Dic-05	6,6549	37	246,2313	91%
Ene-06	0	37	0	0%
Feb-06	0	37	0	0%

Fuente: Registros Minera Escondida Limitada (Estación Meteorológica Cerro Marcelo).

Para este análisis se supone que el Lodo en el lugar de disposición final, pierde el 100% del agua, por lo tanto se considera que el agua que no es evaporada cae por infiltración al subsuelo. Se puede ver que el intervalo de agua presente en el Lodo depositado que es evaporada cae entre el 48 y el 91%, el resto del agua contaminada se infiltra por el subsuelo, generando el otro impacto ambiental.

CAPÍTULO 5 ESTUDIO LEGAL APLICADO AL MANEJO DE LODOS.

5.1 Requerimientos Legales.

Para el análisis de los requerimientos legales que le corresponde cumplir a cualquier operación e instalación de Plantas de Tratamiento de Residuos, se han definido tres tipos de requerimientos legales y operacionales que se deben consumir para manejar los Residuos Industriales que la Empresa genere, de acuerdo a su grado específico de aplicación, estos residuos corresponden a los Lodos Secundarios obtenidos del Tratamiento de las Aguas Residuales, estos son:

- Obtención de Permisos y Tramitación.
- Requerimientos Legales Operacionales.
- Requerimientos Legales Técnicos.

5.1.1 Obtención de Permisos y Tramitación.

Estos requerimientos corresponden a los permisos y jurisprudencia que los distintos organismos del estado otorgan o aplican, entre éstos se encuentran:

- D.F.L. N°725/1967 del Ministerio de Salud, "Código Sanitario". Artículos 79 a 81.

El Artículo 79 y 80, indican que cualquier proyecto que proceda a la construcción, reparación, modificación y ampliación de cualquier Planta de Tratamiento de basuras y desperdicios de cualquier clase, será necesaria la aprobación previa del proyecto por el Servicio de Salud respectivo. El artículo 81 en cambio, establece que los vehículos o sistemas de transporte de materiales, deberá reunir los requisitos que señale la autoridad.

- D.S. N°594/1999 del Ministerio de Salud, "Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo". Artículos 18 y 20.

El Artículo 18, Señala que la acumulación, tratamiento y disposición final de residuos industriales (sólido o líquido, o combinación de estos, que provienen de

procesos industriales y que no corresponden a residuos domésticos) dentro del predio industrial (concesión minera) deberá contar con una autorización sanitaria.

- DFL N°1/1989 del Ministerio de Salud, “Determina las Materias que Requieren Autorización Sanitaria Expresa”. Artículo 1.

El Artículo 1, Señala las materias que requieren autorización sanitaria expresa entre las que se encuentran aquellas relacionadas con el manejo de aguas servidas, residuos industriales o mineros, basuras y desperdicios de cualquier clase.

- Ordinario N°6014/1993 de la Subsecretaría de Salud, “Características Finales de Lodos para ser Tratados como Residuos Sólidos. Artículo 2 y 3.

El Artículo 3, indica que las industrias, previo al tratamiento y/o disposición final de sus residuos sólidos, sea que este se realice dentro o fuera del predio industrial, deben presentar a la autoridad sanitaria una declaración en que conste la calidad y cantidad de los residuos industriales que generen. Esta disposición es aplicable cuando estos Lodos se manejan como residuos sólidos.

- Reglamento de Rellenos Sanitarios, Enero del 2003 (No vigente aún, proyecto que se encuentra en consulta pública).

Establece que sólo se podrán disponer Lodos en un relleno sanitario si la instalación cuenta con autorización sanitaria para dicha actividad.

- Resolución Exenta N°563/2000 de la Comisión Nacional del Medio Ambiente, “Anteproyecto del Reglamento Para el Manejo de Lodos generados En Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas”. (Aún no entra en vigencia).

El Artículo 9 y 10 señala que toda planta de tratamiento de aguas servidas deberá contar con un proyecto de ingeniería aprobado por el Ministerio de Salud de la Región, además dicho proyecto, que contemplará el manejo de los lodos que se generan en las distintas unidades que conforman la planta de tratamiento de aguas servidas, deberá garantizar que no existirán riesgos para la salud, el bienestar de la población y el medio ambiente.

El Artículo 11, indica que el almacenamiento de lodos crudos por períodos superiores a los definidos en el proyecto como los necesarios para la alimentación del

proceso de estabilización, sólo se podrá realizar en casos de problemas operativos en el tratamiento de lodos, por un lapso no superior al plazo aprobado por la Autoridad Sanitaria

EL Artículo 16, señala que se debe pedir autorización sanitaria para poder disponer los Lodos conjuntamente con los residuos domiciliarios en los rellenos sanitarios.

El Artículo 33, indica que todo generador de Lodos regulado por el decreto, debe presentar anualmente, en el mes de enero, ante las Secretarías Regionales Ministeriales de Salud y las Direcciones Regionales del Servicio Agrícola Ganadero que correspondan informes técnicos en duplicado respecto del cumplimiento de las exigencias establecidas en el reglamento del año calendario anterior.

5.1.2 Requerimientos Legales Operacionales.

Este tipo de requerimientos son todos los mencionados sobre la operación en el manejo de Residuos Industriales generados en la Empresa, específicamente en el manejo de Lodos Secundarios obtenidos en el Tratamiento de Aguas Residuales. Entre éstos se encuentran:

- D.S. N°594/1999 del Ministerio de Salud, “Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo”.

El Artículo 3, señala que la Empresa está obligada a mantener en los lugares de trabajo las condiciones sanitarias y ambientales necesarias para proteger la vida y la salud de los trabajadores que en ellos se desempeñan, sean estos dependientes directos o contratistas.

El Artículo 11, los lugares de trabajo deben mantenerse en buenas condiciones de orden y limpieza. Además deben tomarse medidas efectivas para evitar la entrada o eliminar la presencia de insectos, roedores y otras plagas de interés sanitario.

El Artículo 12 y 14, señalan que todo lugar de trabajo deberá contar con agua potable destinada al consumo humano y necesidades básicas de aseo personal e higiene, de uso individual o colectivo, con una dotación mínima de 100 litros/persona/día.

El Artículo 17, determina que en ningún caso podrán incorporarse a las napas de aguas subterráneas de los subsuelos las aguas contaminadas con productos

tóxicos de cualquier naturaleza, sin ser previamente sometidos a los tratamientos de neutralización o depuración que prescriba en caso la autoridad sanitaria.

El Artículo 21, señala que todo lugar de trabajo debe estar provisto de servicios higiénicos, de uso individual y colectivo, que dispondrán como mínimo de excusado y lavatorio. También indica que en caso de suciedad corporal, deberán disponerse de duchas con agua fría y caliente para los trabajadores afectados.

El Artículo 33, indica que los agentes contaminantes que puedan ser perjudiciales para la salud del trabajador, se deberán captar en su origen e impedir su dispersión por el local de trabajo.

El Artículo 37, señala que deberá suprimirse en los lugares de trabajo cualquier factor de peligro que pueda afectar la salud o integridad física de los trabajadores.

- Reglamento de Rellenos Sanitarios, Enero del 2003 (No vigente aún, proyecto que se encuentra en consulta pública).

Indica que la Disposición Final de Lodos se deberá realizar en celdas, zanjas o sectores especialmente habilitados, en donde se deberá dar recubrimiento inmediato a los residuos sin que necesariamente se deba compactar los residuos.

- Resolución Exenta N°563/2000 de la Comisión Nacional del Medio Ambiente, “Anteproyecto del Reglamento Para el Manejo de Lodos generados En Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas”. (Aun no entra en vigencia).

El Artículo 14, determina que las unidades de almacenamiento, tratamiento y disposición final de lodos deberán diseñarse de manera que controlen la infiltración de líquidos hacia aguas subterráneas y su escurrimiento hacia cursos o masas de aguas superficiales.

5.1.3 Requerimientos Legales Técnicos.

Éstos consisten en todas las exigencias técnicas que se deben cumplir para manejar y disponer el Lodo generado en las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas o Residuos Industriales en general.

- Resolución Exenta N°563/2000 de la Comisión Nacional del Medio Ambiente, “Anteproyecto de Reglamento Para el Manejo de Lodos generados En Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas”. (Aun no entra en vigencia)

5.1.3.1 Sobre la Clasificación de Lodos

El Artículo 5, señala que los lodos se clasifican de acuerdo a dos parámetros:

- Reducción del Potencial de Atracción de Vectores (Artículo 6): se debe disminuir en un 38% los Sólidos Volátiles presentes en el Lodo.
- Presencia de Patógenos. Se divide en dos clasificaciones Lodos Clase A (Artículo 7) y Lodos Clase B (Artículo 8), cada uno con sus requerimientos técnicos para alcanzar esta clasificación.

En la Figura 5.1 se puede ver la clasificación general que se le da a los Lodos.

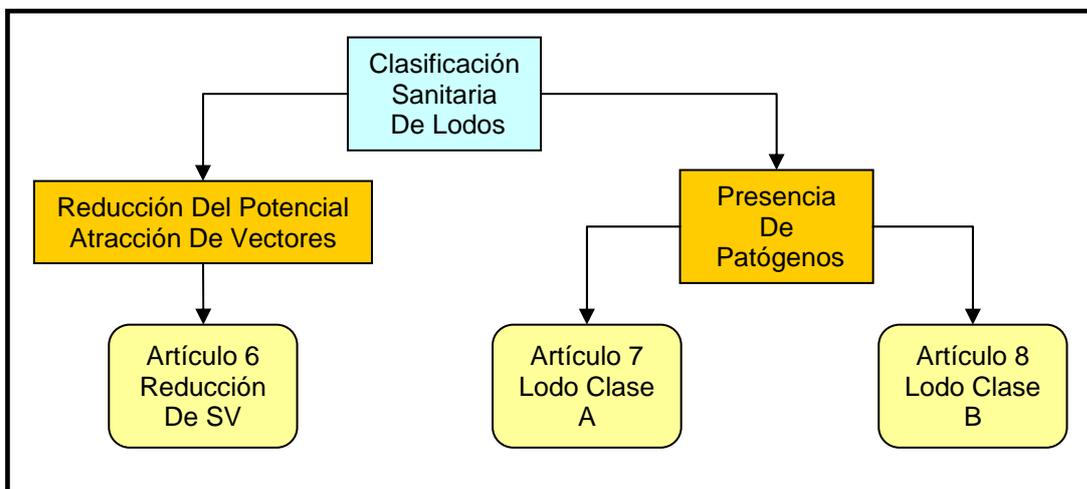


Figura 5.1: Clasificación Sanitaria de Lodos.

El Artículo 6, determina que se clasificarán como lodos estabilizados o con reducción del potencial de atracción de vectores sanitarios, a los que se les ha reducido los sólidos volátiles en un 38 % como mínimo. Pero dice que también se considerarán estabilizados aquellos Lodos que cumplan con alguno de los siguientes requerimientos:

1. Reducción del contenido de sólidos volátiles.

- a) Si los lodos son tratados por digestión anaeróbica, y la reducción de sólidos volátiles es inferior al 38%, es posible demostrar la reducción de atracción de vectores mediante una prueba de digestión adicional de lodos a escala de laboratorio. La reducción de atracción de vectores queda demostrada si después de la digestión anaeróbica de los lodos por un período adicional de 40 días a una temperatura de entre 30 y 37°C, los sólidos volátiles son reducidos en un porcentaje inferior al 17% del valor al inicio de este período.

- b) Si los lodos son tratados por digestión aeróbica, y la reducción de sólidos volátiles es inferior al 38%, es posible demostrar la reducción de atracción de vectores mediante una prueba de digestión adicional de lodos con un porcentaje de 2% de sólidos o menos a escala de laboratorio. La reducción de atracción de vectores queda demostrada si después de la digestión aeróbica de los lodos por un período adicional de 30 días a una temperatura de 20°C, los sólidos volátiles en los lodos son reducidos en un porcentaje inferior al 15% del valor al inicio de este período.

2. 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 sólidos totales, base materia seca, a una temperatura de 20°C. Este indicador deberá ser utilizado para lodos procedentes del tratamiento de aguas de lodos activados del tipo aireación extendida.

3. 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.

4. 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.

5. Reducción de humedad.

En caso que los lodos no contengan lodos crudos provenientes de un tratamiento primario de aguas servidas, 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.

El Artículo 7, indica que se considerarán Lodos Clase A aquellos que cumplan con los siguientes requisitos, adicionalmente al cumplimiento de la reducción de la atracción de vectores:

1. Tener una densidad de coliformes fecales menor a 1.000 Número Más Probable (NMP) por gramo de sólidos totales, base materia seca, o tener una densidad de *Salmonella sp.* menor a 3 NMP en 4 gramos de sólidos totales, base materia seca.
2. Tener un contenido de ova helmíntica viable menor a 1 en 4 gramos de sólidos totales, base materia seca.

El Artículo 8, determina que los Lodos Clase B deberán cumplir el siguiente requisito, adicionalmente al cumplimiento de la reducción de la atracción de vectores: la media geométrica del contenido de coliformes fecales, producto del análisis de un número de muestras no inferior a siete, tomadas al momento de su uso o de su eliminación, debe ser menor que 2.000.000 NMP por gramo de sólidos totales, en base materia seca.

5.1.3.2 Sobre el Almacenamiento de los Lodos

El Artículo 11, indica que el almacenamiento se podrá realizar a través de estanques o lagunas confinadas que eviten la emanación de olores y la atracción de vectores. Además, deberá contemplar la extracción de los gases generados y su posterior quema.

El Artículo 12, señala que sólo se permitirá el almacenamiento en la planta de tratamiento de aguas servidas de lodos estabilizados en cantidades inferiores a 5 toneladas. Si la cantidad es superior a 5 toneladas, se deben retirar diariamente. Junto con esto revela que el diseño y operación del sitio de almacenamiento deberá garantizar que no existirán riesgos para la salud, el bienestar de la población y el medio ambiente.

El Artículo 13, determina que Los lodos clase B podrán ser almacenados en cantidades hasta 35 toneladas y por un plazo máximo de 7 días sin restricciones adicionales. El almacenamiento de lodos clase B en cantidades y plazos superiores a los señalados anteriormente se debe realizar cumpliendo las exigencias para un mono-relleno, señaladas en el Artículo 17, o a través de un sistema de confinamiento

que asegura que se controlan la generación de olores, la atracción de vectores y la migración de líquidos al suelo.

5.1.3.3 Sobre el Transporte de Lodos.

El Artículo 15, indica que el transporte de lodos deberá realizarse en vehículos completamente estancos y cerrados que impidan escurrimientos y derrames de los lodos durante su traslado. El transporte de lodos clase A o B y que presenten una humedad igual o inferior a 85%, podrá realizarse en recipientes cubiertos en condiciones que impidan el escurrimiento, el derrame o la emisión del material particulado durante el mismo

5.1.3.4 Sobre la Disposición Final de Lodos.

El Artículo 2, señala que se prohíbe el uso, disposición, aplicación o vertimiento de Lodos provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas que no se efectúe en la forma y condiciones contempladas en el mismo reglamento, así como de aquellos Lodos que presenten alguna característica de peligrosidad de acuerdo al DS 148/2003 del Ministerio de Salud (Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos). El Artículo 14 del D.S. 148/2003, indica que cuando la eliminación de un residuo se haga a través de la disposición final en el suelo se considerará que el respectivo residuo tiene el carácter de peligroso cuando el Test de Toxicidad por Lixiviación arroje, concentraciones superiores a la tabla de Concentraciones Máximas Permisibles (CMP).

5.1.3.4.1 Rellenos Sanitarios

El Artículo 16, indica que en rellenos sanitarios sólo se podrán disponer lodos de las clases A y B, para lo cual se requerirá de una autorización sanitaria para disponerlos conjuntamente con los residuos domiciliarios. La cantidad de lodos a disponer diariamente en un relleno sanitario no deberá ser superior a un 6% del total de los residuos dispuestos diariamente, pudiendo autorizarse, en condiciones justificadas, hasta un 8%. La humedad media diaria del lodo a disponer no deberá superar el 70%, con un máximo de 75% por muestra. En caso de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas servidas con una capacidad de hasta 30.000 habitantes, la humedad media diaria del lodo no debe superar el 75%, con un máximo de 80% por muestra.

El Artículo 30, corrobora que los Lodos con destino a un relleno sanitario, deberán contar con análisis de reducción de atracción de vectores, de la presencia de patógenos y del contenido de humedad, de acuerdo a lo señalado en el artículo 16, cuando corresponda.

5.1.3.4.2 Mono-Rellenos

El Artículo 17, determina que en mono rellenos sólo se podrán disponer Lodos que cumplan con los criterios de estabilización (Artículo 6), es decir, que se reduzca el Potencial de Atracción de Vectores Sanitarios (reducir el 38% como mínimo de los sólidos volátiles).

Los mono-rellenos podrán ser proyectados como instalaciones anexas a las plantas de tratamiento de aguas servidas o de rellenos sanitarios de residuos sólidos domiciliarios. Los proyectos de mono-rellenos para lodos deberán contemplar sistemas de impermeabilización, de recolección de lixiviados y de manejo de biogás. Durante la operación del mono-relleno se requerirá del recubrimiento diario de los residuos, pudiendo la Autoridad Sanitaria exigir una mayor frecuencia si se generan problemas de olores durante la operación del sitio.

El Artículo 30, corrobora que los Lodos que se depositen en un mono-relleno, deberán contar con análisis de la reducción de atracción de vectores, de acuerdo a lo señalado en el artículo 17.

5.1.4 Selección de Requerimientos Legales Técnicos aplicados a la Empresa

Se han seleccionado los Requerimientos Técnicos que señala el Reglamento para el manejo de Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (no vigente aún), esto debido a la escasa o nula Legislación que existe en Chile sobre este tema, y también al interés por parte de la Empresa para disminuir el riesgo potencial de la legislación pertinente que se encuentra en desarrollo. A continuación se señalan las Políticas respectivas de la Empresa, que se manifiesta mediante los siguientes:

- Plan Estratégico del Negocio de la Empresa.
- Plan Operativo de la Vicepresidencia de Salud, Seguridad y Medio Ambiente (HSE).
- Estándares Operacionales de la Superintendencia de Medio Ambiente.

5.1.4.1 Políticas Principales del Plan Estratégico del Negocio de la Empresa.

El Plan Estratégico del Negocio de la Empresa se debe aplicar a toda la compañía. De aquí surgen todos los proyectos que se van a desarrollar para cumplir con este Plan. Las estrategias principales con respecto al proyecto son:

- Compromiso más absoluto con la Salud y Seguridad de quienes trabajan en Escondida y la responsabilidad con el Medio Ambiente y el Desarrollo Sustentable.
- Objetivo Estratégico: Mejorar y fortalecer el Desarrollo Sustentable.

5.1.4.2 Políticas Principales de la Vicepresidencia HSE.

Las políticas que la Vicepresidencia de Salud, Seguridad y Medio Ambiente con respecto al proyecto son:

- Cumplir y, cuando sea apropiado, exceder los Requerimientos Legales aplicables.
- Establecer y lograr objetivos que incluyan la reducción de la contaminación y prevención de la contaminación.
- Cuidar el Medio Ambiente.

5.1.4.3 Políticas Principales de la Superintendencia de Medio Ambiente.

Las políticas y objetivos principales que la Superintendencia de Medio Ambiente tiene con respecto al proyecto son:

- Desarrollar proyectos que tiendan a la reducción de las amenazas de cuerpos legales en desarrollo.
- Desarrollar proyecto para cumplir con el Reglamento de Manejo de Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas que aún no se encuentra en vigencia.
- Mejorar el manejo de Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas.
- Disminuir el Impacto Ambiental que se genera producto del Manejo de Lodos.

A partir de estas políticas y objetivos surge la manifestación de algunos requerimientos técnicos que la Superintendencia de Medio Ambiente se pronuncia acerca de la implementación del manejo adecuado de Lodos Secundarios generados

en las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas que opera la Empresa. Entre éstos se encuentran:

- El transporte del Lodo desde el lugar de generación a su disposición final, será llevado a cabo por camiones succionadores.
- De requerir un Almacenamiento y/o Tratamiento de Lodos éstos se efectuarán en el lugar de Disposición Final.
- Dentro de los métodos de Estabilización de Lodos que existen se escogieron como posible candidatos, la Digestión Anaerobia, Digestión Aerobia o Tratamiento Alcalino.
- La disposición final del Lodo generado se realizará en un Mono-Relleno construido al interior del predio industrial.

5.1.4.4 Requerimientos Legales Técnicos Aplicados a la Empresa.

Éstos corresponden a lo exigido por el “Reglamento Para el Manejo de Lodos Generados en Plantas de Tratamiento e Aguas Servidas” (no se encuentra en vigencia aun) y que se deben aplicar al manejo de Lodos de Minera Escondida Limitada para disminuir el riesgo potencial de incumplimiento legal.

5.1.4.4.1 Disposición Final.

Los requisitos técnicos involucrados en la Disposición Final de Lodos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 5.1: Requisitos Legales Técnicos en la Disposición Final de Lodos.

Aspecto Considerado	Política Empresa	Artículos Asociados	Requerimientos Técnicos
Disposición Final	Método: Mono-Relleno	Artículo 2	Se prohíbe la disposición final de Lodos que presenten características de Peligrosidad (DS N° 148).
		Artículo 17	En Mono-Rellenos, sólo se podrán disponer Lodos que cumplan con la reducción del potencial de atracción de vectores sanitarios (Artículo 6).
		Artículo 17	La construcción del Mono-Relleno debe considerar sistemas de: - impermeabilización - recolección de lixiviados - manejo de biogás
		Artículo 17	Durante la operación se requerirá del recubrimiento diario de los residuos.
		Artículo 30	Los Lodos que se depositen deberán contar con un análisis de la reducción de atracción de vectores (disminuir el 38% de SV).

Fuentes: Política de Medio Ambiente, "Reglamento Para el Manejo de Lodos Generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas.

5.1.4.4.2 Tratamiento

En la Tabla 5.2 se exponen los requerimientos legales técnicos acerca del tratamiento o estabilización de Lodos Secundarios, estos requerimientos parten de la base que la disposición final del Lodo se realizará en un Mono-Relleno ubicado al interior del predio industrial.

Tabla 5.2: Requisitos Legales Técnicos para el Tratamiento.

Aspecto Considerado	Política Empresa	Artículos Asociados	Requerimientos Técnicos
Tratamiento (Estabilización)	1. Selección de los posibles tratamientos: -Digestión Aerobia -Digestión Anaerobia -Tratamiento Alcalino	Artículo 17 y Artículo 6	El Artículo 17 señala la justificación del tratamiento ya que dice que en Mono-Rellenos, sólo se podrán disponer Lodos que cumplan con la reducción del potencial de atracción de vectores sanitarios (Artículo 6).
	2. Ubicación del Tratamiento: Lugar de Disposición Final		Artículo 6: Disminuir en un 38% los Sólidos Volátiles presentes en el Lodo (También se indica que se consideran estabilizados con una serie de procesos que se nombran en la normativa)

Fuentes: Política de Medio Ambiente, “Reglamento Para el Manejo de Lodos Generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas.

5.1.4.4.3 Almacenamiento

A continuación se muestran los requerimientos técnicos legales del almacenamiento en el manejo para Lodos Secundarios crudos.

Tabla 5.3: Requisitos Legales Técnicos para el Almacenamiento.

Aspecto Considerado	Política Empresa	Artículos Asociados	Requerimientos Técnicos
Almacenamiento	Ubicación: Mono-Relleno	Artículo 11	Almacenamiento en estanques y/o lagunas confinadas. - Evitar emanación de olores y atracción de vectores. - Debe contemplar la extracción de gases generados y su posterior quema. Lagunas de Almacenamiento: - Sistema de impermeabilización lateral y de fondo (lámina sintética de polietileno de al menos 0,76 mm de espesor ubicada sobre una capa de arcilla de espesor no inferior a 30 cm.

Fuentes: Política de Medio Ambiente, “Reglamento Para el Manejo de Lodos Generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas.

5.1.4.4.4 Transporte

En la Tabla 5.4, se revelan los requerimientos legales técnicos asociados al transporte de Lodos.

Tabla 5.4: Requisitos Legales Técnicos para el Transporte.

Aspecto Considerado	Política Empresa	Artículos Asociados	Requerimientos Técnicos
Transporte	Transporte en camiones succionadores	Artículo 15	Transporte en vehículos completamente estancos y cerrados que impidan escurrimientos y derrames de los lodos durante su traslado. Lodos que presenten una humedad igual o inferior a 85%, podrá realizarse en recipientes cubiertos en condiciones que impidan el escurrimiento, el derrame o la emisión del material particulado

Fuentes: Política de Medio Ambiente, “Reglamento Para el Manejo de Lodos Generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas.

En conclusión los requerimientos legales técnicos corresponden a:

- Transporte de Lodos en Camiones estancos y cerrados.
- Evitar escurrimiento y derrames de Lodos en el Transporte.
- Almacenamiento de Lodos en estanques o lagunas confinadas.
- Disposición final en Mono-Rellenos.
- Presencia de sistemas de impermeabilización en el Mono-Relleno.
- Presencia de sistemas de recolección de lixiviados en el Mono-Relleno.
- Presencia de sistema de manejo de biogás.
- Disminución de un 38% de Sólidos Volátiles en el Lodo.
- Evitar la emanación de olores en todo el manejo.
- Evitar la atracción de vectores.

Para este proyecto, el requerimiento principal es la Disminución en un 38% de la cantidad inicial de Sólidos Volátiles presentes en el Lodo Secundario. A partir de este requerimiento, se realizará el análisis de los métodos mayormente usados a nivel mundial para poder obtener una propuesta del tratamiento de Lodos generados en las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas de Minera Escondida Limitada.

CAPÍTULO 6 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO

6.1 Análisis de las Alternativas de Tratamiento Acordadas.

El siguiente análisis se realizó de acuerdo a tres alternativas de tratamiento de Lodos que se aplican de acuerdo a la bibliografía asociada, en base a la disminución del porcentaje de Sólidos Volátiles presentes en el mismo. Éstas son:

- Digestión Aerobia.
- Digestión Anaerobia.
- Tratamiento Alcalino

El Análisis realizado, se enfoca en ciertos parámetros que fueron seleccionados en consenso con la Superintendencia de Medio Ambiente y que se consideraron los más relevantes a la hora de implementar un sistema de manejo de estos residuos. La idea es utilizar estos parámetros o aspectos de manera de diferenciar cada proceso de estabilización que cae dentro del análisis (aerobio, anaerobio y alcalino) de tal manera de cumplir con las estrategias de la compañía, a partir de esto se han considerado los siguientes parámetros o aspectos:

- Cumplimiento Legal.

Se refiere a que si el proceso respectivo cumple con la reducción de Sólidos Volátiles en un 38% (o que se aplique alguno de los tratamientos nombrados en la normativa en desarrollo que permite la equivalencia a la reducción del 38% de Sólidos Volátiles presentes en el Lodo) con respecto al contenido de éstos en el Lodo generado en las correspondientes Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas.

- Impacto Ambiental.

Es acotado a la generación de olores que puede generar el proceso. Se limita a la formación de Amoniaco y Sulfuros de Hidrógeno, ya que éstos son los principales responsables de los olores desagradables y dañinos que genera el Lodo. No se toma en cuenta el impacto ocasionado por la infiltración de aguas contaminadas hacia el subsuelo, ya que esto forma parte de la Disposición Final y no del tratamiento.

Otro impacto ambiental que se considera es la capacidad de inmovilizar algunos Metales Pesados en el Lodo Secundario.

- Características Operacionales.

Corresponden al análisis de los aspectos técnicos propios de cada proceso, la selección de estas características operacionales se basa en los parámetros técnicos que son comparables para los tres procesos que entran al análisis y que corresponden a los de mayor importancia para alcanzar el objetivo deseado. Estos son:

- 1.- Tiempo de Retención Hidráulico: Se considera Bueno el rango entre 0 y 7 días, mayor a este valor contempla la categoría de Regular.
- 2.- Condiciones de Deshidratado del Producto: De acuerdo a bibliografía y adquiere la clasificación de Bueno o Regular.
- 3.- Reducción de Sólidos Suspendidos Volátiles: Adquiere la clasificación de Bueno o Regular, en base al rango de disminución de Sólidos Volátiles presente en la bibliografía.
- 4.- Necesidad de Mezclado: Implica si el proceso requiere de un mezclado.
- 5.- Costo de Implementación: Clasificación de Alto y Bajo.
- 6.- Volumen del Producto Final: Indica si el Volumen del Lodo en la salida de cada proceso aumenta o disminuye con respecto a la entrada del mismo.
- 7.- Concentración de Sólidos en la Alimentación: Señalan los valores que requieren los procesos para su buen funcionamiento, en este caso se toma en cuenta que el Lodo de entrada viene con 1,51% de Sólidos.
- 8.- Estabilización del Producto: Determina si con la aplicación del proceso respectivo se alcanza la estabilización que se requiere.

- Equipos o Dispositivos del Proceso.

Señala los equipos o dispositivos que requiere cada proceso para su funcionamiento, mientras menor sea la cantidad de equipos o dispositivos que se necesiten, mejor será la alternativa ya que trae consigo menores costos de implementación. Entre los equipos cuentan:

- 1.- Estanque de Almacenamiento.
- 2.- Bombas.
- 3.- Intercambiador de Calor.

- 4.- Compresores.
- 5.- Sobrenadante; necesidad de dispositivos de retiro.
- 6.- Equipos energéticos.

6.2 Resultado del análisis.

A continuación se presenta el resultado del análisis realizado de acuerdo a los parámetro o aspectos seleccionados, en la Tabla 6.1 se muestran los criterios de aplicación de cada proceso.

Tabla 6.1: Resultado de análisis de acuerdo a cada parámetro y proceso.

Aspecto	Parámetro	Tratamiento		
		Aerobio	Anaerobio	Alcalino
Cumplimiento Legal	Cumplimiento Legal	Si	Si	Si
Impacto Ambiental	Producción de Olores			
	Amoniaco	Si	Si	Si
	Sulfuros	Si	Si	No
	Inmovilización de Metales Pesados	No	No	Si
Equipos o Dispositivos	Estanque de Almacenamiento	Si	Si	Si
	Necesidad de Bombas	Si	Si	Si
	Intercambiadores de Calor	No	Si	No
	Compresores (aire)	No	Si	No
	Sobrenadante	Si	Si	No
	Necesidad de Dispositivos de Retiro	Si	Si	No
	Equipos Energéticos en el Proceso	Si	Si	Si
	Nivel de Necesidad	Bajo	Alto	Bajo
Características Operacionales	Tiempo de Retención Hidráulico, días (Metcalf & Eddy, 1995)	10 a 15	12 a 18	2 Horas
	Condiciones de Deshidratado en el Producto	Regular	Regular	Buenas
	Reducción de Sólidos Volátiles	Buena	Buena	Regular
	Necesidad de Mezclado	Si	Si	Si
	Costo de Implementación	Alto	Alto	Bajo
	Volumen del Producto Final	Disminuye	Disminuye	Aumenta
	Concentración de Sólidos en la Alimentación	1,5 a 4,5	0,8 a 2	0,3 a 2,5
	Estabilización del Producto	Si	Si	Si

Fuente: Elaboración Propia.

A partir de la Tabla 6.1 se enumeró con el valor 0 para las condiciones que presentaban desventajas de los parámetro seleccionados, y con valor 1 en el caso contrario. La Tabla 6.2 presenta lo explicado anteriormente.

Tabla 6.2: Ventajas y desventajas en de los procesos analizados

Aspecto	Parámetro		Tratamiento		
			Aerobio	Anaerobio	Alcalino
Cumplimiento Legal	Cumplimiento Legal		1	1	1
Impacto Ambiental	Producción de Olores				
		Amoniaco	0	0	0
		Sulfuros	0	0	1
		Inmovilización de Metales Pesados	0	0	1
Equipos o Dispositivos	Estanque de Almacenamiento		0	0	0
	Necesidad de Bombas		1	1	1
	Intercambiadores de Calor		1	0	1
	Compresores (aire)		1	0	1
	Sobrenadante		0	0	1
		Necesidad de Dispositivos de Retiro	0	0	1
	Equipos Energéticos en el Proceso		0	0	0
		Nivel de Necesidad	1	0	1
Características Operacionales	Tiempo de Retención Hidráulico (días)		0	0	1
	Condiciones de Deshidratado en el Producto		0	0	1
	Reducción de Sólidos Volátiles		1	1	0
	Necesidad de Mezclado		0	0	0
	Costo de Implementación		0	0	1
	Volumen del Producto Final		1	1	0
	Concentración de Sólidos en la Alimentación		0	1	1
	Estabilización del Producto		1	1	1
Ventajas			9	7	14
Desventajas			11	13	6

Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede ver en la Tabla 6.2, el tratamiento más adecuado que se debe aplicar al Lodo Activado en exceso generado en las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas de la Empresa para alcanzar los requerimientos legales técnicos y ambientales es el Tratamiento Alcalino.

CAPÍTULO 7 PROPUESTA DE TRATAMIENTO

7.1 Propuesta para el tratamiento de Lodos Secundarios.

La estabilización alcalina se divide en dos grandes grupos, la Pre-Estabilización Alcalina y la Post-Estabilización Alcalina. La diferencia radica en que la Post-Estabilización requiere de la deshidratación del Lodo antes de ingresar al proceso de estabilización mientras que en la Pre-Estabilización ingresa el Lodo Secundario en exceso. Para la estabilización alcalina, se pueden emplear distintos tipos de materiales alcalinos, entre los más utilizados se encuentran la Cal Viva (CaO) y la Cal Hidratada (Ca(OH)₂).

Se ha acordado que el mejor proceso para el manejo de los Lodos generados en las PTAS de Minera Escondida Limitada es la Post-Estabilización Alcalina, esto debido a que es el proceso alcalino más estudiado y también ya que en el mercado se encuentran procesos patentados de fácil implementación que acarrearán buenos resultados, incluso el producto obtenido es usualmente empleado en la agricultura como acondicionador de suelos y/o como fertilizante.

Con respecto a la materia prima o material alcalino, la Cal Viva es el material más adecuado para el tratamiento, debido a:

- La Empresa en sus procesos ocupa Cal Viva, lo que disminuiría el costo en materia prima. Y también el personal de la Empresa ya se encuentra familiarizado con la manipulación de este material
- Al mezclar la Cal Viva con el Lodo, se forma cal hidratada disminuyendo el porcentaje de humedad en éste.

7.2 Descripción del Proceso propuesto.

El proceso contiene dos Líneas de operación:

- Línea de Cal.
- Línea de Lodo Secundario.

La Línea de Cal comienza con el suministro de Cal Viva (CaO) transportado por un camión que deposita el material en un Estanque Almacenador, luego mediante una correa transportadora (tornillo sin fin) el material es conducido a un silo que tiene la función de alimentar al mezclador con el material (Cal Viva).

Desde el mezclador el material (con Lodo Secundario) es llevado, mediante una correa transportadora (tornillo sin fin), hacia un equipo deshidratador (preferentemente un Filtro de Banda) que disminuye la presencia de agua al material para luego ser dispuesto finalmente a un Mono-Relleno ubicado dentro del predio industrial.

Con respecto a la Línea Lodo, éste viene de las PTAS mediante camiones que depositan el Lodo Secundario en exceso (sin digerir) a un estanque almacenador, en seguida pasa a un espesador de Lodos secundarios residuales donde se disminuye un 5% en peso de Lodo. Luego el Lodo espesado es transportado, mediante tuberías y bombas hacia el mezclador donde se junta con el material alcalino para la respectiva estabilización, una vez que el Lodo es estabilizado es posteriormente deshidratado para disminuir el porcentaje de humedad del mismo y, finalmente es dispuesto en un Mono-Relleno ubicado en el interior del predio industrial.

En los sistemas de espesado y deshidratado del Lodo Secundario, se genera agua contaminada que es trasladada a una PTAS ubicadas en el mismo terreno en donde ocurre el tratamiento de Lodos Secundarios. El agua limpia que sale de la PTAS es infiltrada al suelo acogiéndose a la NCH 1333 of 78 (Requisitos de Calidad de Agua Para Diferentes Usos) y al DS N°46 (Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas) cuando corresponda. En esta PTAS, se genera Lodo Secundario pero en bajas cantidades, éste es llevado a la cabeza del proceso de tratamiento de Lodos. En la Figura 7.1 se muestra el diagrama del proceso.

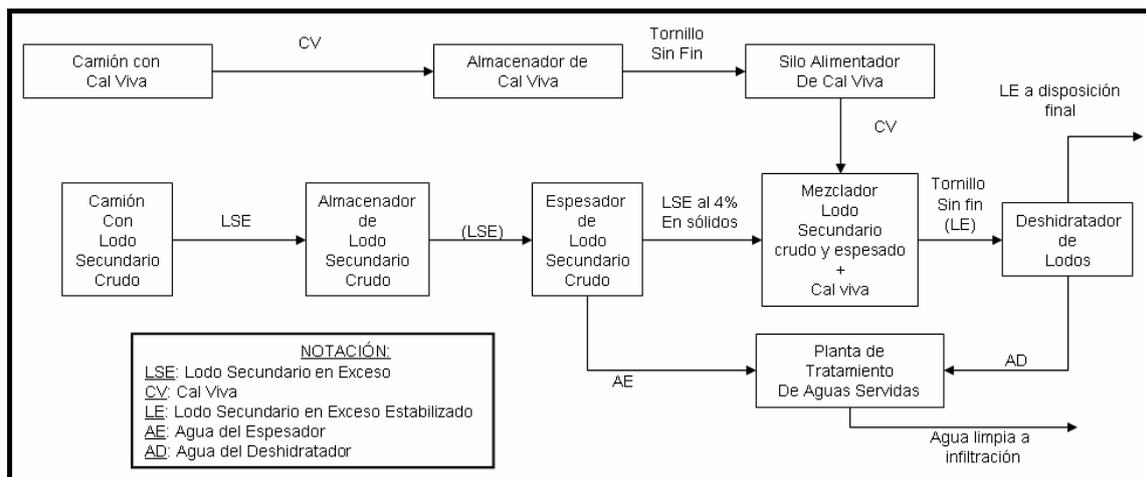


Figura 7.1: Diagrama del Proceso propuesto.

7.3 Características Operacionales de los Elementos del Proceso

A continuación se presentan las características operacionales de los elementos que estructuran la propuesta.

7.3.1 Línea de Cal

A. Entradas del Proceso

Ésta corresponde a la alimentación de Cal Viva en la Línea de Cal caracterizándose por lo siguiente:

- Cantidad Teórica necesaria, este valor se obtuvo de acuerdo a la razón de aplicación kg de Cal/kg de Sólidos secos presentes en el Lodo que equivale a 0,38 (Girovich, 1996)
- Densidad de Cal Viva (Girovich, 1996): 921 kg/m³.

B. Equipos Necesarios.

1. Camión de Transporte de Cal Viva.

- Debe contener un sistema de succionado del material a transportar.
- Debe disponer de un dispositivo de descarga del material a transportar.
- El tamaño más grande de las partículas de cal hacia el camión que puede ser bombeado es de 3,2 cm.
- El sistema de descarga puede durar hasta 60 minutos.

2. Almacenador de Cal.

- Pueden estar hechos de acero al carbón y/o cubos de concreto, ya que la cal viva no es corrosiva.

3. Correa Transportadora.

- Debe estar cerrada para la prevención de emisión de material particulado.

4. Silo Alimentador de Cal.

- Deben permanecer cerrados y herméticos.
- Uso de Vibrador electromagnético para permitir el escurrimiento del material.
- Las paredes interiores no deben estar pintadas y deben permanecer lisas.
- El interior puede estar recubierto por materiales plásticos para permitir el escurrimiento de material.
- La razón entre altura/diámetro es aconsejable que se ubique entre el rango de 2,5 a 4 (Spinosa y Vesilind, 2001).
- El fondo debe ser cónico y tener una pendiente mínima de 60° con respecto a la horizontal.

7.3.2 Línea de Lodo Secundario.

Esta Línea abarca todo el proceso que sigue el Lodo.

A. Entradas del Proceso

Ésta corresponde a la alimentación de Lodo Secundario que proviene de las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas ubicadas al interior del predio industrial.

- Cantidad (Tabla 4.7): 301 m³/mes; 10,03 m³/día.
- Masa del Lodo Secundario (Tabla 4.7): 276.318 kg/mes; 9.210,6 kg/día.
- Volumen de Agua en el Lodo Secundario (Tabla 4.7): 272,15 m³/mes; 9,07 m³/día.
- Densidad del Lodo Secundario (ver Tabla 4.7): 918 kg/m³.

B. Equipos Necesarios.

1. Camión de Transporte de Lodo Secundario.

- Debe contener un sistema de succionado del material a transportar.
- Debe disponer de un dispositivo de descarga del material a transportar.

2. Estanque Almacenador de Lodos.

- Pueden estar hechos de concreto.

3. Espesador de Lodos Secundarios.

- Espesador tipo centrífuga.
- Alcanzando una concentración del 4 % de sólidos presentes en el Lodo Secundario.
- Dispositivo de descarga del Agua contaminada producto del proceso.

4. Mezclador Lodo Secundario - Cal Viva.

- Con capacidad de mezclar por 2 horas el Lodo secundario con la Cal Viva.

5. Deshidratador de Lodos.

- Se utilizará un filtro de Banda.
- Con capacidad de deshidratar la mezcla Lodo Secundario-Cal Viva hasta alcanzar una concentración teórica del 40% de sólidos en peso (60% en peso de humedad).

7.3.3 Tratamientos alternativos.

Se debiera construir una pequeña Planta de Tratamiento de Aguas Servidas ubicada al interior de la instalación del tratamiento (lugar de disposición final) para poder tratar las aguas contaminadas provenientes del Espesador y del Deshidratador de Lodos Secundarios. Ésta pequeña Planta generará a su vez un Lodo Secundario que vuelve a la cabeza del tratamiento de Lodos, sin embargo, esta cantidad es despreciable. El agua que tratará esta planta no vuelve a las PTAS que se encuentran en funcionamiento, ya que el lugar de estabilización de Lodos Secundarios en exceso se encuentra a 11 kilómetros.

CAPÍTULO 8 BALANCE DE MASA

Este análisis se hizo en base a los materiales que son dinámicos en el proceso, es decir, Lodo Secundario, Cal Viva y Agua. Para la obtención el valor de las densidades de la Cal Viva y Agua, se consultó a la bibliografía, pero para la densidad del Lodo se realizó un análisis de laboratorio (ver Tabla 4.7). Las densidades correspondientes son las siguientes:

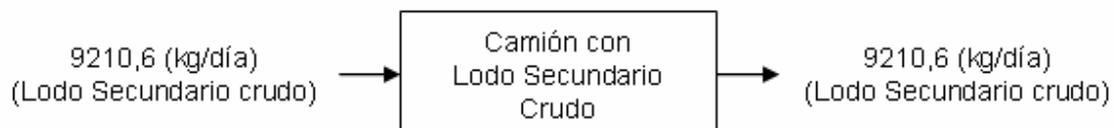
- Densidad de Cal Viva (Girovich, 1996): 921 kg/m^3 .
- Densidad del Agua a 14°C promedio (Metcalf & Eddy, 1995): 1.000 kg/m^3 .
- Densidad del Lodo (Tabla 4.7): 918 kg/m^3 .

La dosis de Cal Viva (CaO) se obtuvo en base a la bibliografía que señala que para alcanzar la estabilización alcalina ($\text{pH} = 12$ por dos horas) del Lodo Secundario en Exceso, se debe aplicar 0.38 kg de Cal Viva por cada kg de Sólidos Secos presentes en el Lodo Secundario Crudo.

8.1.1 Línea de Lodo Secundario.

- Camión de Transporte de Lodo Secundario.

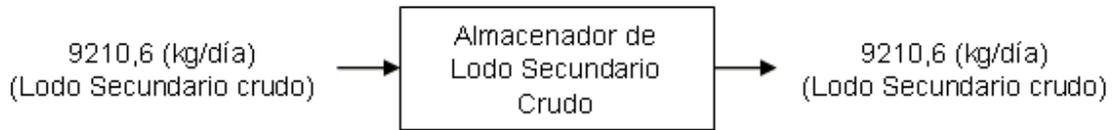
El flujo considerado corresponde a la carga diaria, es decir $10,03 \text{ m}^3$ (ya que la generación mensual es de 301 m^3) y sabiendo que la densidad del Lodo es de 918 kg/m^3 , se obtuvo que la masa de entrada y salida del camión corresponde a $9210,6 \text{ kg/día}$.



- Almacenador de Lodos.

Para la cantidad se considera el flujo diario de entrada y salida, sin embargo, este recipiente debe tener una capacidad de almacenamiento para 7 días de carga.

La cantidad diaria de entrada y salida, corresponde a la conversión en días de la cantidad mensual generada ($301 \text{ m}^3/\text{mes}$), es decir $10,03 \text{ m}^3/\text{día}$. Sabiendo que la densidad del Lodo es de 918 kg/m^3 , tenemos que la masa de entrada y salida es de $9.210,6 \text{ kg/día}$.



- Espesador.

Se sabe que el equipo es capaz de espesar el Lodo Secundario hasta obtener un contenido del 4% de sólidos en éste. También se sabe que el Lodo viene con un porcentaje en peso de humedad de 98,49%. Por lo tanto considerando que al Espesador entran $139,08 \text{ kg/día}$ de sólidos secos (que corresponden al 1,51% en peso del Lodo secundario crudo), salen del proceso estos mismos $139,08 \text{ kg/día}$ de sólidos secos pero ahora esta cantidad corresponde al 4% en peso del Lodo crudo secundario. Con estos datos se puede observar que el lodo sale del espesador con una masa total de 3477 kg/día , de los cuales 3338 kg/día corresponden a sólo agua, es decir del espesador salen $5.733,6 \text{ kg/día}$ de agua (que va a la cabeza de la PTAS que se construirá).



- Mezclador.

El Balance de Masa para este elemento de proceso, se realizó considerando que en el compartimiento se generarán nuevos productos, es decir, existen reacciones químicas involucradas dentro de éste. Por lo tanto el Balance se confeccionó en base a Balances por Componentes en Sistemas Reaccionantes (Reklaitis, 1983).

Este tipo de Balance consiste en la obtención del valor de cada flujo y componente de entrada y salida del compartimiento. Para esto, las reacciones que se llevan a cabo dentro de éste son las siguientes:



La Ecuación 8.1 corresponde a la formación de Hidróxido de Calcio ($Ca(OH)_2$), quien es el compuesto encargado de la estabilización alcalina, ya que al mezclarse con agua se disocia en los iones Ca^{+2} y OH^- , de los cuales solo el ión OH^- es el responsable de aumentar el pH.

Para la obtención de las ecuaciones que se llevan a cabo dentro del “reactor”, se consideraron los siguientes supuestos y consideraciones:

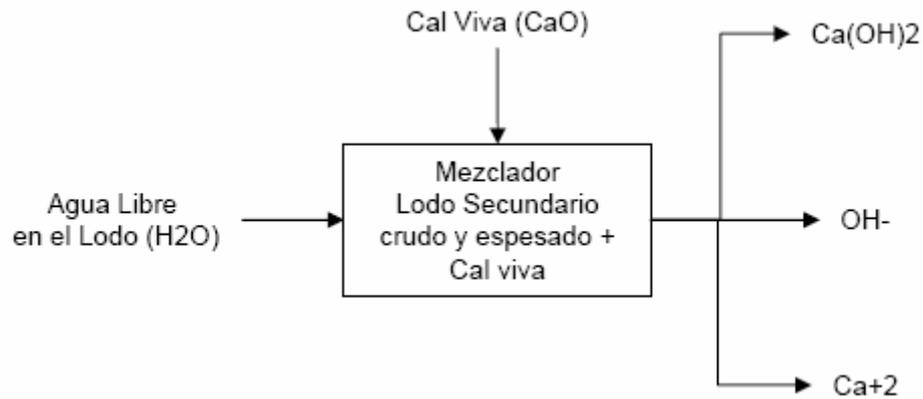
a) Supuestos.

- Los sólidos presentes en el Lodo no participan de las reacciones.
- Las cantidades de agua intracelular, agua capilar y agua coloidal (ver Capítulo 2) se consideraron despreciables, es decir, participa en la reacción sólo el agua libre presente en el Lodo, que corresponde a toda la humedad que contenga el Lodo Secundario de entrada.

b) Consideraciones:

- pH del Lodo Secundario de entrada es igual a 7 (ver Tabla 4.7).
- Dosis de aplicación de Cal Viva (CaO): 0.38 kg de Cal Viva/kg de sólidos secos presentes en el Lodo Secundario, es decir, 52,85 kg/día de Cal Viva .
- De la Bibliografía se sabe que 1 kg de CaO reacciona con 0.32 kg de H_2O para formar 1.32 kg de $Ca(OH)_2$.
- Entran al mezclador 3477 kg/día de Lodo Secundario de los cuales 139,08 kg/día (4% en peso) corresponden a los Sólidos Secos presentes en el Lodo y 3337,92 los kg/día de Agua presentes en éste.

La figura siguiente muestra todos los flujos de entrada y salida del mezclador.



Para la obtención de los flujos molares de entrada y salida se empleó la siguiente ecuación (Reklaitis, 1983):

$$N_s^{Sal.} = N_s^{Ent.} + \sum_{r=1}^R \sigma_{sr} r_r \quad [\text{Ec. 8.3}]$$

Donde:

$N_s^{Sal.}$: Flujo molar de salida de la sustancia s (moles/día).

$N_s^{Ent.}$: Flujo molar de entrada de la sustancia s (moles/día).

σ_{sr} : Coeficiente estequiométrico del componente o sustancia s de la reacción r (negativo para los reactantes y positivo para los productos).

r_r : Velocidad de reacción (moles/día).

Se denotaron a los flujos molares de la siguiente manera:

- H_2O : Flujo molar 1.
- CaO : Flujo molar 2.
- Ca(OH)_2 : Flujo molar 3.
- Ca^{+2} : Flujo molar 4.
- OH^- : Flujo molar 5.

Considerando las Ecuaciones 8.1, 8.2 y 8.3 se obtuvieron los siguientes balances de masa:

- $N_1^{Sal.} = N_1^{Ent.} - r_1$
- $N_2^{Sal.} = N_2^{Ent.} - r_1$
- $N_3^{Sal.} = N_3^{Ent.} + r_1 - r_2$
- $N_4^{Sal.} = N_4^{Ent.} + r_2$
- $N_5^{Sal.} = N_5^{Ent.} + 2r_2$

Los Datos conocidos se muestran en la Tabla 8.2.

Tabla 8.2: datos conocidos para Balance de Masa

Pesos Moleculares			
Compuesto	PM (gr/mol)	PM (kg/mol)	
CaO	56,08	0,05608	
H ₂ O	18	0,018	
Ca(OH) ₂	74,08	0,07408	
Masa y moles de entrada Totales			
Tipo	Compuesto	Masa (kg)	Moles (mol/día)
Entrada Mezclador	CaO	52,85	942,40
Entrada Mezclador	H ₂ O	3337,92	185440,00
Entrada Reacción 8.1	CaO	52,85	942,40
Entrada Reacción 8.1	H ₂ O	16,91	939,56
Salida Reacción 8,1	Ca(OH) ₂	69,76	941,71
Salida Mezclador	H ₂ O	3321,01	184500,44
Coeficientes de Reacción			
Compuesto	Reacción 1 (σ_1)	Reacción 2 (σ_2)	
Cal Viva (CaO)	-1	0	
Agua (H ₂ O)	-1	0	
Hidróxido de Calcio (Ca(OH) ₂)	1	-1	
Ión Calcio (Ca ⁺²)	0	1	
Ión Hidroxilo (OH ⁻)	0	2	

Fuente: Elaboración propia.

Reemplazando los valores conocidos (ver Tabla 8.2) los respectivos balances de masa se representaron de la siguiente manera:

- $184500,44 \left[\frac{\text{moles}}{\text{día}} \right] = 185440 \left[\frac{\text{moles}}{\text{día}} \right] - r_1$
- $N_2^{Sal.} = 942,40 \left[\frac{\text{moles}}{\text{día}} \right] - r_1$
- $N_3^{Sal.} = 0 + r_1 - r_2$
- $N_4^{Sal.} = 0 + r_2$
- $N_5^{Sal.} = 0 + 2r_2$

A partir de las ecuaciones de Balances de Masa obtenidas se pudieron obtener los datos para los siguientes datos:

- $r_1 = 939,555556$
- $r_2 = 2,156108$
- $N_2^{Sal.} (CaO) = 2,848153 \left[\frac{\text{moles}}{\text{día}} \right]$
- $N_3^{Sal.} (Ca(OH)_2) = 941,71 \left[\frac{\text{moles}}{\text{día}} \right]$
- $N_4^{Sal.} (Ca^{+2}) = 2,156108 \left[\frac{\text{moles}}{\text{día}} \right]$
- $N_5^{Sal.} (OH^-) = 4,312215 \left[\frac{\text{moles}}{\text{día}} \right]$

Considerando los datos señalados anteriormente se pudo obtener la concentración del compuesto Hidroxilo $[OH^-]$, que se consiguió considerando el volumen de agua que salió del mezclador ($3,321 \text{ m}^3$, ver Tabla 8.2). Esta concentración corresponde a $0,001298466$ (moles/litro), por lo tanto la “mezcla” sale del mezclador con un pH igual a $11,1134$.

La Figura 8.1 muestra los Flujos Másicos de entrada y salida del mezclador, obtenidos mediante la multiplicación de los correspondientes Flujos Molares con los correspondientes Pesos Moleculares.

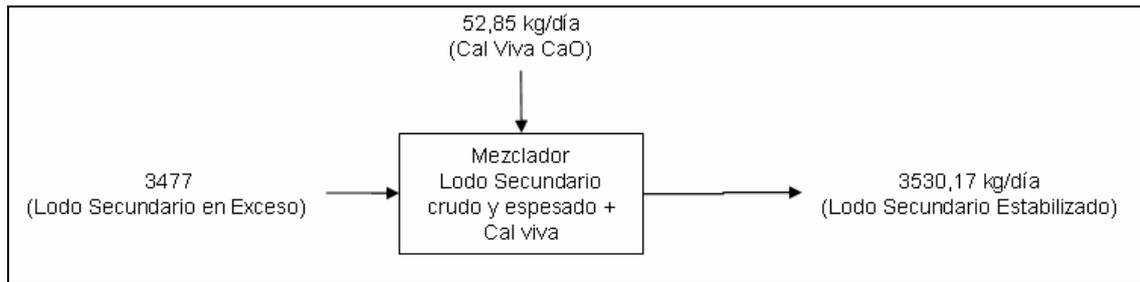


Figura 8.1: Flujos Másicos de entrada y salida del mezclador.

En la Tabla 8.3 se muestran los flujos másicos y molares de todos los compuestos que entran y salen del mezclador

Tabla 8.3: Flujos Másicos y Molares (Mezclador).

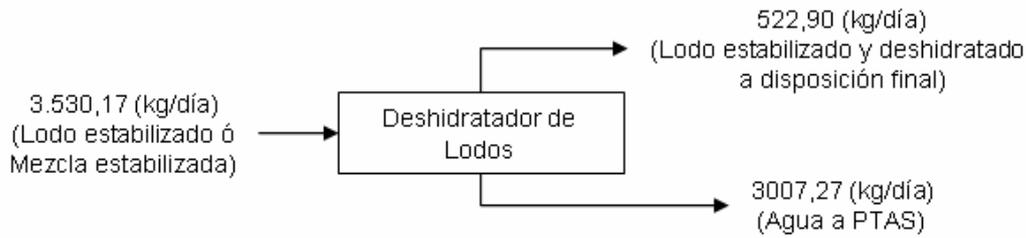
Compuesto	(moles/día) Salida	(moles/día) Entrada	(kg/día) Salida	(kg/día) Entrada
CaO	2,85	942,40	0,16	52,85
H ₂ O	184.500,44	185.440	3.321,01	3.337,92
Ca(OH) ₂	941,71	0	69,76	0
Ca ⁺²	2,16	0	0,09	0
OH ⁻	4,31	0	0,07	0
Sólidos Secos			139,08	139,08
Sólidos Totales			209,16	139,08
Lodo Secundario			3.530,17	3.477,00
Total			3.530,17	3.529,85

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 8.3

- Deshidratador.

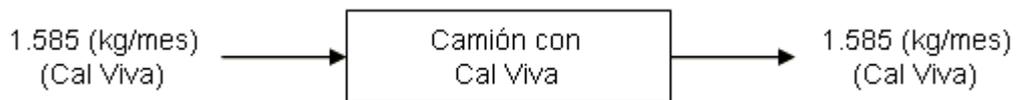
En el caso de la deshidratación asumimos que el Lodo se deshidrata hasta llegar a un contenido de sólidos del 40% utilizando un filtro de banda, la masa de los sólidos secos que entra al deshidratador corresponden a 209,16 kg/día, por otro lado la masa de agua entrante corresponde a 3321,01 kg/día (94,08% en peso). Para saber el Flujo másico de salida del deshidratador, se debe considerar que el 40% de éste corresponde a sólidos secos, es decir, que 209,16 kg/día corresponden al 40%, por lo tanto, el 100% de la masa de Lodo Secundario Estabilizado y Deshidratado equivale a 522,90 kg/día, por consiguiente el flujo másico del agua que sale del Deshidratador es de 3007,27 kg/día.



8.1.2 Línea de Cal

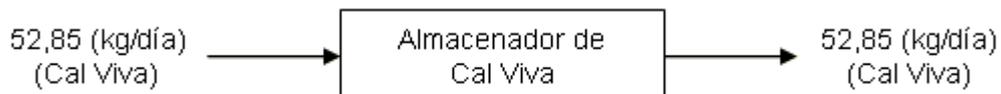
- Camión de Transporte de Cal Viva.

La cantidad que entra al camión es la cantidad que se necesita para el suministro de 1 mes, es decir, el camión debe tener una capacidad de carga de 1.585 kg (la cantidad diaria que se necesita es de 52,85 kg).



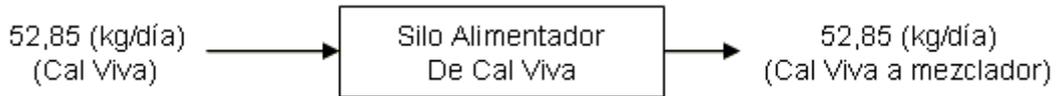
- Almacenador de Cal.

Para la cantidad se considera el flujo diario de entrada y salida y no el flujo mensual con que este recipiente recibe el material, sin embargo, éste se cargará una vez al mes. La cantidad diaria de entrada y salida, corresponde a la relación de 0,38 Kg de cal viva/Kg de sólidos secos presentes en el Lodo. Es decir la cantidad de Cal diaria necesaria en el proceso es de 52,85 Kg/día.



- Silo Alimentador de Cal.

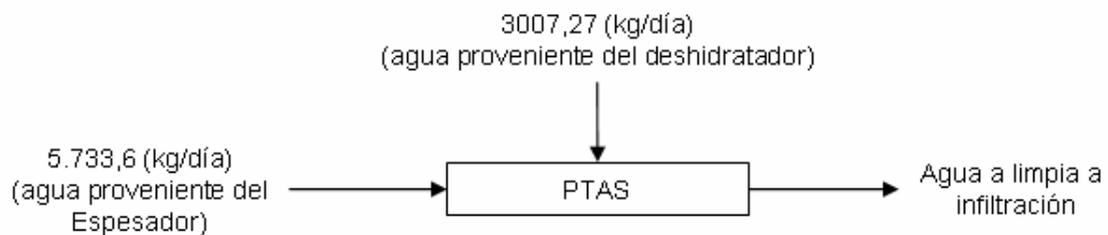
Al igual que el almacenador el flujo de entrada y salida es diario, y la cantidad se obtiene de acuerdo a la relación de aplicación Kg de Cal/Kg de sólidos presentes en el Lodo secundario.



8.1.3 Tratamientos Alternativos.

- Planta de Tratamiento de Aguas Servidas.

En esta planta ingresa el agua proveniente del Espesador (5.733,6 kg/día) y del deshidratador (3007,27 kg/día) es decir el caudal de entrada es de 8,74 m³/día. El agua de salida de esta planta se lleva a infiltración en el suelo, y el Lodo generado es llevado a la cabeza del tratamiento, sin embargo, como el caudal es tan bajo, se puede considerar a la cantidad de Lodo generado como despreciable. Se puede notar que el agua proveniente del deshidratador viene con un pH básico de aproximadamente 11,11, para esto se acordó que la empresa encargada de proveer la PTAS se ocupará de disminuir el pH del agua, ya que éste es perjudicial para la actividad microbiológica.



8.1.4 Diagrama general del Balance de Masa

La Figura 8.1 muestra el Balance de Masa resumido a partir de los antecedentes anteriores.

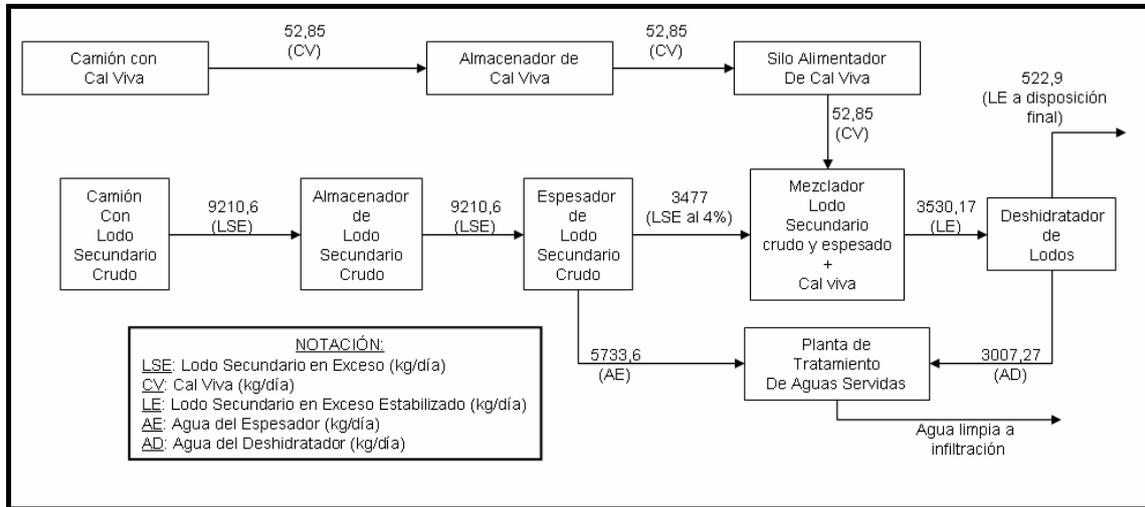


Figura 8.2: Diagrama del Balance de Masa del Proceso

CAPÍTULO 9 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Este capítulo se enfoca en una estimación de recursos económicos que se necesitan para implementar o instalar la propuesta de mejoramiento del sistema de Manejo de Lodos generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas ubicadas en la Empresa. Por acuerdo con la Empresa, el proyecto tiene un horizonte de evaluación de 5 años, de los cuales se consideraron una contratación de personal de 1100 empleados adicionales (Dato entregado por la Gerencia de Recursos Humanos) y que generarán aproximadamente el 50% adicional del flujo de Lodos Secundarios en Exceso de hoy en día, es decir de 452 m³/mes (ver Tabla 4.7). Las especificaciones técnicas de los Equipos y las Obras físicas se estimaron de acuerdo a las necesidades futuras de la demanda de tratamiento de Lodos Secundarios en Exceso. La Tabla 9.1 muestra los niveles de producción con un 50% adicional.

Tabla 9.1 Características de producción de Lodos (50% adicional).

Parámetro	Valor	Valor (50% adicional)
Masa del Lodo (kg/mes)	276.318	414.936
Masa de Agua en el lodo (kg/mes)	272146	408.670,47
Masa de Sólidos del lodo (kg/mes)	4.172	6.265,53
Volumen de Agua del lodo (m ³ /mes)	272,15	408,67
Volumen de sólidos del lodo (m ³ /mes)	4.55	6,83
Densidad del Lodo (kg/m ³)	918	918
Densidad del Agua a 14°C (kg/m ³)	1.000	1.000
% de Humedad del lodo en Peso	98,49	98,49
% de Sólidos del lodo en peso	1,51	1,51
Dosis de Cal (kg Cao/kg sólidos secos)		
Mensual	1.585,36	2.380,9
Diaria	52,85	79,36
Producción del Lodo (m ³ /mes)	301	452
Diaria (m ³ /día)	10,03	15,07

Fuente Elaboración

En la Tabla 9.2 se dan las capacidades de carga y volumétricas correspondientes a la Necesidad Real (situación Actual) y la Necesidad del Proyecto (50% adicional).

Tabla 9.2: Capacidades de carga y volumétrico de Elementos.

Ítem	Flujo Real		Flujo 50% Adicional	
	Capacidad Carga (kg)	Capacidad Volumétrica (m3)	Capacidad carga (kg)	Capacidad Volumétrica (m3)
Camión de Cal	1.585,36	2	2.378,27	3
Almacenador de Cal	1.585,36	2	2.378,27	3
Silo de Cal	52,85	1	79,28	1
Camión de Lodo	9.210,60	10	13.815,90	15
Almacenador de Lodo	64.474,20	70	96.711,30	105
Espesador	9.210,60	10	13.815,90	15
Mezclador	3.477,00	4	5.215,50	6
Deshidratador	3.530,17	4	5.295,26	6
PTAS	8.740,87	9	13.111,31	13

Fuente: Elaboración Propia.

9.1 Tamaño y Localización.

Se acordó que el lugar de localización de la planta se encontrará en la misma zona donde se sitúan las trincheras de infiltración (disposición final actual de Lodos Secundarios). Éste está a una distancia de aproximadamente 13 km desde el radio de ubicación de las PTAS. Con respecto al tamaño de la zona de ubicación, ésta contiene un área de 10.000 m².

9.2 Equipos.

9.2.1 Especificaciones técnicas de los Equipos.

- Camión de Cal: con capacidad de carga y volumétrica de 2.378 kg y 3 m³ respectivamente. No se cotiza la compra del camión ya que éste lo proporciona la Empresa.
- Camión de Lodo: con capacidad de carga y volumétrica de 13.816 kg y 15 m³ respectivamente. No se cotiza la compra del camión ya que éste lo proporciona la Empresa.
- Espesador de Lodos: con capacidad de carga y volumétrica de 13.816 kg y 15 m³ respectivamente. Será proporcionado por la Empresa Aquamarket, siendo capaz de espesar al 4% el Lodo Secundario en Exceso.
- Deshidratador: es un Filtro de Banda que debe ser capaz de tratar 6 m³/día de Lodo Secundario Estabilizado. Proporcionado por la Empresa Akros. Con capacidad para que el Lodo adquiera un 40% de Sólidos Secos.
- Tuberías: proveídas por la Empresa Aquamarket. La Tabla 9.3 Indica alguna de las características técnicas.

Tabla 9.3: Características Técnicas de las Tuberías.

Tuberías	Ubicación	Material	Material de Transporte	Caudal (m ³ /día)	Diámetro (m)
Tubería 1	Almacenador Lodos - Espesador	HDPE	Lodo Secundario Crudo	15	200
Tubería 2	Espesador - Mezclador	HDPE	Lodo Secundario Crudo	6	200
Tubería 3	Espesador - PTAS	HDPE	Agua	9	150
Tubería 4	Deshidratador - PTAS	HDPE	Agua	5	150

Fuente: Elaboración Propia.

- Tornillos Sin Fin: Un tornillo tiene la función de transportar Cal (capacidad de carga de 80 kg) al silo, para esto se elevará 3 metros desde la superficie, adquiriendo una longitud de 4,24 metros. El segundo tornillo sin fin funcionará de manera horizontal y medirá 3 metros, la función de éste es transportar la mezcla al deshidratador (capacidad de carga de 5.296 kg). Ambos serán de acero inoxidable.
- PTAS: Esta Planta de tratamiento debe procesar alrededor de 10 m³/día. Será entregada “llave en mano” por la Empresa Aguasín.
- Bombas: Las bombas empleadas son de exclusivo tratamiento para tratar ciertos tipos de materiales. Las cotizaciones fueron efectuadas por la Empresa Aguamarket.

Tabla 9.4: Características técnicas de las bombas necesitadas.

Modelo	Marca	Ubicación	Caudal [l/min]	Diámetro de Sólidos en Suspensión (mm)	Potencia(hp)	kw
VXC	Pedrollo	Almacenador Lodos-Espesador	1200	70	1	0,75
VXC	Pedrollo	Espesador-Mezclador	1200	70	1	0,75
VXC	Pedrollo	Espesador-PTAS	1200	70	1	0,75
VXC	Pedrollo	Deshidratador-PTAS	1200	70	1	0,75

Fuente: Elaboración Propia.

9.2.2 Balance de Equipos.

Para el Balance de Equipos, se debe saber que los costos asociados para cada uno de ellos fueron proporcionados por la Gerencia de Ingeniería y Construcción junto con las empresas proveedoras. Cada uno de estos equipos posee su propia vida útil, ésta fue obtenida de la página web de Servicios Impuestos Internos de Chile. La depreciación de cada equipo se calculó de acuerdo al método de “Depreciación Lineal”, ya que éste es el utilizado en Chile, para ésta se consideró que el valor de salvamento o valor de desecho es igual a cero, la depreciación de los equipos es sólo un dato de referencia ya que en la Evaluación Económica del proyecto no se debe incluir ya que no es un proyecto de inversión. La Tabla 9.5 señala los costos asociados a la adquisición de cada equipo junto con sus respectivas depreciaciones.

Tabla 9.5: Costos y depreciación de cada equipo.

Equipo	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total	Costo Total + IVA	Vida Útil	Depreciación
Camión de Cal	1	-	-	-	10	-
Camión de Lodo	1	-	-	-	10	-
Espesador	1	1.002.386	1.002.386	1.192.839	10	119.284
Deshidratador	1	3.213.000	3.213.000	3.823.470	7	546.210
Tuberías	4	55.461	221.844	263.994	18	14.666
Tornillo Sin Fin	2	834.997	1.669.994	1.987.293	7	283.899
PTAS	1	5.985.000	5.985.000	7.122.150	7	1.017.450
Bombas	4	480.800	1.923.200	2.288.608	8	286.076
Total				16.678.355	Total	2.267.585

Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede ver en la Tabla 9.5, la vida útil de los equipos a adquirir se encuentran sobre la duración de la evaluación del proyecto, por lo tanto en equipos no se hará ninguna reinversión durante los primeros 5 años.

9.3 Obras Físicas.

- Almacenador de Cal: De forma cilíndrica con capacidad de carga y volumétrica de 2378 kg y 3 m³ respectivamente. Éste será de concreto, ya que este material presenta mayor duración con respecto al polietileno y además la Empresa posee la materia prima para construirlo (Gerencia de Ingeniería y Construcción).
- Almacenador de Lodo Secundario: De forma cilíndrica con capacidad de carga y volumétrica de 96.711 kg y 105 m³ respectivamente. Al igual que el almacenador de Cal también será hecho de concreto.
- Silo de Cal: De forma cónica con capacidad de carga y volumétrica de 80 kg y 1 m³. El volumen requerido es insignificante, sin embargo, el Silo se encontrará a 3 metros de altura para poder alimentar con Cal al mezclador, por lo tanto se construirá una pequeña torre de hierro que sirva como base sostenedora del silo.
- Movimiento de tierra: El lugar de disposición tiene una superficie de 10000 m², éste ya se encuentra preparado para la implementación de la planta de tratamiento de Lodos Secundarios, debido a que es el mismo lugar donde se encuentran las trincheras de infiltración, que ocupan una superficie de 1000 m². Sin embargo, existen algunos movimientos de tierra que lo harán las mismas maquinarias que presenta la Empresa, entre estos se encuentra la preparación del terreno para el montaje de las obras y el lugar de recogida y retirada del material.
- Montaje: este servicio será gestionado por la Gerencia de Ingeniería y Construcción, sin embargo, se externalizará (empresa contratista) por políticas de la Compañía.
- Caseta de recepción y vigilancia: Se encontraría en la Entrada de la instalación, pero lo más apartado posible, debido a la salud del personal. Contendrá un baño con ducha y lavamanos, también habrá una ducha al exterior del lugar de empleados para desinfectar al empleado a la entrada del lugar.

La Tabla 9.6 Señala los costos asociados al Balance de Obras Físicas.

Tabla 9.6: Costos Asociados a las obras físicas de la propuesta.

Ítem	Especificación Técnica	Costo \$US
Almacenador de Cal	Concreto	714.000
Almacenador de Lodo Secundario	Concreto	6.854.400
Silo de Cal	Polietileno, HDPE, Base Hierro	536.120
Movimiento de Tierra		650.000
Montaje	Equipos y Obras Físicas	485.000
Caseta de Recepción		1.150.000
Total		10.389.520

Fuente: Elaboración Propia, (sapag, 2006)

9.4 Personal.

La Planta de Residuos será administrada por el mismo supervisor que está encargado de las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas de la Empresa. Se contratará 8 trabajadores de los cuales 4 corresponden a Operadores de Planta, 4 encargados del camión de Lodo. Para el camión de Cal no se contratará personal adicional ya que como el abastecimiento de Cal es mensual, no se requerirá de personal semanal. Habrán 2 personas encargadas del camión de Lodo, que estarán disponible 12 horas diarias, con un turno de 4 días trabajando y 4 días de descanso, por eso el requerimiento se cumple para 4 trabajadores (turno). Habrán 2 operadores de planta que trabajarán 12 horas diarias y con un turno de 4 días trabajando y 4 días de descanso. La Tabla 9.7 muestra el requerimiento de personal.

Tabla 9.7: Mano de obra (personal).

Cargo	N° de Puestos	Remuneración Mensual en \$ pesos	
		Unitaria	Total
Operario Planta	4	450.000	1.800.000
Personal Camión	4	400.000	1.600.000
Total			3.400.000

Fuente: Elaboración Propia, Gerencia Recursos Humanos (Sapag, 2006).

9.5 Insumos.

- Combustible

Para el valor del costo del combustible necesario, se considera que la carga de Cal se realizará mensualmente y la carga de Lodo se realizará diariamente. Junto con esto tenemos que los kilómetros aproximados entre los lugares de abastecimiento y la instalación propuesta es de 22 Km ida y vuelta.

Se tomó un precio del petróleo a 420 Pesos/litro, y el rendimiento de los camiones es de 3 Kilómetros/Litro (Los volúmenes se derivan desde el balance de masa realizado en el Capítulo 8). En la Tabla 9.8 se muestran los costos asociados al combustible.

Tabla 9.8: Costos en combustible.

Vehículo	Distancia Recorrida (km/mes)	Rendimiento (km/litro)	Combustible (m3/mes)	Costo (\$) pesos/mes)
Camion de Cal	22	3	0,007	3080
Camión de Lodo	154	3	0,051	21560
Total				24640

Fuente: Elaboración Propia, (Sapag, 2006).

- Cal Viva.

La Empresa ha indicado que no se necesitará de la adquisición de este material debido a que lo utilizan en los procesos mineros, no teniendo problemas para que se abasteciera mensualmente de Cal viva.

- Agua Potable.

En la Planta se abastecerá de agua Potable para los baños y las duchas de emergencia que se encontrarán en la caseta de recepción. Para este abastecimiento, se llenará un estanque de proporciones despreciables, ya que sólo habrán dos personas en el recinto.

- Energía.

El consumo energético lo presenta el funcionamiento de las bombas, y la electricidad de la caseta de recepción. Con respecto a la caseta de recepción, ésta se estimó de 80 kwh mensuales, con un costo de 70 \$ pesos/kwh. Con respecto a las bombas (, éstas funcionarán al menos 8 Horas diarias, por lo tanto su consumo energético será como se muestra en la Tabla 9.9.

Tabla 9.9: Costos de energía.

Ítem	Consumo Total (kwh/mes)	Precio de kwh (\$)	Costo Total (\$/mes)
Caseta de Recepción	80	70	5600
Bombas	720	70	50400
Total			56000

Fuente: Elaboración Propia, (Sapag, 2006).

- Mantenimiento.

Se aplicará un mantenimiento correctivo (Sapag, 2006), es decir, una reacción sólo cuando hay ocurrencia de falla, por lo tanto, se dejará una cierta cantidad de dinero que corresponde al promedio del costo de los Equipos dividido por el periodo de Evaluación del proyecto (Costo Promedio equipos = \$ 2.779.726; periodo de evaluación = 5 años), es decir de \$ 556.000 anuales.

9.6 Flujo de Caja

Aquí no se considerará ningún indicador de rentabilidad, ya que no se trata de un proyecto de inversión donde se perciban ingresos (Sapag, 2006). Los beneficios de este proyecto, son: mantener una buena relación con el gobierno de Chile mediante el cumplimiento de la legislación ambiental aplicable y disminuir el costo que se pueda incurrir por una posible multa de incumplimiento legal. Por lo antes señalado se va a considerar dos temas de valor económico, que son La Inversión Inicial del proyecto y los Costos asociados al funcionamiento de éste.

Como los costos de insumos, personal y mantenimiento están dados para periodos mensuales, se debe corregir los flujos mensuales a anuales, para esto se utilizó la siguiente ecuación (Blank, 2004):

$$VF = CM * \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i} \right] \quad [\text{Ec. 9.1}]$$

Donde:

VF : Valor del Costo en el año correspondiente.

CM : costo mensual (\$).

i : interés anual. Para este parámetro se consideró la tasa de interés que cobra la Banca para créditos de consumo, es decir, 8,3% anual.

La Tabla 9.10: muestra los valores anuales de los costos de insumos, personal y mantenimiento (costos fijos) del proyecto.

Tabla 9.10: costos anuales de combustible, personal y mantenimiento.

Ítem	Año					
	0	1	2	3	4	5
Personal						
Operario Planta	-	\$ 22.409.872	\$ 22.409.872	\$ 22.409.872	\$ 22.409.872	\$ 22.409.872
Personal Camión	-	\$ 19.919.886	\$ 19.919.886	\$ 19.919.886	\$ 19.919.886	\$ 19.919.886
Insumos						
Energía	-	\$ 697.196	\$ 697.196	\$ 697.196	\$ 697.196	\$ 697.196
Combustible		\$ 306.766	\$ 306.766	\$ 306.766	\$ 306.766	\$ 306.766
Mantenimiento		\$ 566.000	\$ 566.000	\$ 566.000	\$ 566.000	\$ 566.000
Total	\$ 0	\$ 43.899.720				

Fuente: Elaboración Propia

La Tabla 9.11 muestra la Inversión Inicial y los Costos Anuales del proyecto.

Tabla 9.11: Inversión Inicial y Costos asociados al proyecto.

Ítem	Año					
	0	1	2	3	4	5
Equipos						
Espesador	1.192.839					
Deshidratador	3.823.470					
Tuberías	263.994					
Tornillo Sin Fin	1.987.293					
PTAS	7.122.150					
Bombas	2.288.608					
Obras Físicas						
Almacenador de Cal	714.000					
Almacenador de Lodo	6.854.400					
Silo de Cal	536.120					
Movimiento de Tierra	650.000					
Montaje	485.000					
Caseta de Recepción	1.150.000					
Personal						
Operario Planta		22.409.872	22.409.872	22.409.872	22.409.872	22.409.872
Personal Camión		19.919.886	19.919.886	19.919.886	19.919.886	19.919.886
Insumos						
Energía		697.196	697.196	697.196	697.196	697.196
Combustible		306.766	306.766	306.766	306.766	306.766
Mantenimiento		566.000	566.000	566.000	566.000	566.000
Flujo Neto	27.067.875	43.899.720	43.899.720	43.899.720	43.899.720	43.899.720

Fuente: Elaboración Propia, (Blank, 2004).

La Tabla 9.10 muestra la inversión inicial que corresponde a \$27.067.875, los flujos restantes muestran de un gasto de funcionamiento de \$43.899.720.

El costo total del proyecto considera llevando todos los Flujos netos al año 0. para esto se utiliza la siguiente ecuación:

$$VP = \sum_{t=0}^5 \frac{FN_t}{(1+i)^t} \quad [\text{Ec. 9.2}]$$

Donde:

VP : Valor de todos los flujos de todos los años llevados al año "0" (\$).

FN : Flujo Neto del año en el periodo t (\$)

i : Tasa de Interés Anual ocupada en el proyecto (8,3%).

t : Año o periodo respectivo.

Aplicando esta fórmula se obtiene que el Costo Total del proyecto en el año "0" (costos de funcionamiento + Inversión Inicial) es de \$185.567.422.

CAPÍTULO 10 CONCLUSIONES Y DISCUSIONES.

Como se ha mencionado anteriormente, es de vital importancia para la Empresa implementar un sistema eficiente para cumplir con la reglamentación que se encuentra en desarrollo, ya que las Empresas operadoras de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas tendrán un plazo de seis meses para realizar un proyecto de ingeniería adecuado para el manejo de Lodos Secundarios generados en las respectivas plantas, a partir de esto tenemos que:

- El manejo actual de Lodos Secundarios generados en las cinco Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas de Minera Escondida Limitada, no cumple con los requisitos técnicos señalados en el nuevo Reglamento Sobre el Manejo de Lodos Generados en Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas, ya que no trata el Lodo, es decir, lo dispone crudo al Mono-Relleno ubicado en el Predio Industrial.
- Los Requisitos Técnicos Legales en desarrollo no son estrictos con respecto a la situación de la compañía, ya que ésta no dispone el Lodo en Rellenos Sanitarios, lo que lleva a mayores exigencias con respecto al tratamiento. Esto favorece enormemente la adecuación del actual manejo con la propuesta realizada.
- El análisis a los posibles tratamientos para estabilizar el Lodo arrojó que el Tratamiento Alcalino era el más adecuado en su implementación, ya que para instalar los otros métodos de estabilización, se necesitaba de un ensayo a escala de laboratorio según el nuevo reglamento del manejo de Lodos. También al describir los parámetros o criterios seleccionados, se obtuvo que este tratamiento era el más amigable para implementarlo en la Empresa.
- Unas de las principales ventajas de la estabilización alcalina son el poco Tiempo de Retención Hidráulico que requiere el tratamiento y el menor impacto ambiental, producto de la generación de olores, con respecto a los otros métodos de estabilización, fundamentado principalmente por la mitigación de formación de compuestos azufrados.

- La estabilización alcalina utilizando Cal Viva es más favorable que el uso de otro material alcalino, ya que cada kg de CaO reacciona con 0,32 kg de H₂O para formar 1,32 kg de Cal Hidratada (Ca(OH)₂), aumentando las condiciones de deshidratado posteriores para el respectivo deshidratado.
- En el Balance de Masa del Mezclador, el pH obtenido es de alrededor de 11,11. Este valor no es el indicado por la Bibliografía, que señala un pH igual a 12, por lo tanto quiere decir que la dosis de Cal Viva aplicada al proceso debiese ser mayor.
- La masa del material que se va a disposición final es de alrededor del 6% de la masa de entrada, esto indica que gran parte de la masa de entrada al proceso es tratado en la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas presente en la Instalación.
- La inversión Inicial del proyecto es de menor magnitud que los costos asociados, esto es debido principalmente a los costos de mano de obra, ya que Minera Escondida es una de las empresas que tiene los costos de mano de obra más altos de Chile, debido a su ubicación geográfica y climática.

BIBLIOGRAFÍA

- ✚ Albertson, Orris E. et. al. "Dewatering Municipal Wastewater Sludges". Published by Noyes Data Corporation. New Jersey, United States of America. 1991.
- ✚ Cortez Cadiz, Elvira Del Carmen. "Fundamentos de Ingeniería Para el tratamiento de Biosólidos generados por la depuración de Aguas Servidas de la Región Metropolitana". Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Química. Santiago de Chile. Enero del 2003.
- ✚ Ganczarczyk, Jerzy J.. "Activated Sludge Process; Theory and Practice". Marcel Dekker, Inc. New York. 1983.
- ✚ Girardi, Michael H.; Water Pollution Control Federation Task Force on Wastewater Biology. "Wastewater Biology: The Microlife". Water Pollution Control Federation. May 1990. 196 pages.
- ✚ Girovich, Mark J.. "Biosolids Treatment and Management; processes for beneficial use". Marcel Dekker, Inc. New York. 1996.
- ✚ Haug, R.T. "The Practical Handbook of Compost Engineering: Principles and Practice". Lewis Publishers. 1993.
- ✚ http://www.escondida.cl/Escondida/proc_productivo.html, visitada el 15 de Junio de 2006, a las 16:00 Horas.
- ✚ Blank, Leland; Tarquin Anthony. "Ingeniería Económica". Mc Graw Hill, México. 2004
- ✚ Lue-Hing C.; Zenz D.R. & Kuchenrither R.. "Municipal sewage sludge management: Processing, Utilization and Disposal. Vol 4. Water Quality Management Library. Technomic Publishing Co. 1992.
- ✚ Metcalf & Eddy. "Ingeniería de Aguas Residuales; tratamiento, vertido y reutilización". Tercera Edición. Vol 1. Editorial McGraw Hill, Inc. España, 1995.

Bibliografía

- ✚ Metcalf & Eddy, INC. "Ingeniería de Aguas Residuales; Tratamiento, Vertido y Reutilización". Tercera Edición. Vol 2. Mc-Graw-Hill, España. 1995.
- ✚ Ministerio de Obras Públicas. DS N°609 "Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos industriales líquidos a sistemas de alcantarillado". Santiago. 7 de Mayo de 1998.
Disponible en: www.conama.cl
- ✚ Prado Sutto, Claudio. "Estabilización de Lodos Mediante Cloración". Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil. Santiago de Chile. 1981.
- ✚ Reklaitis G.V. "Introduction to Material and Energy Balances". Wiley and Sons. 1983.
- ✚ Rittmann, Bruce E. & McCarty, Perry L.. "Biotecnología del Medio Ambiente; principios y aplicaciones". Editorial McGraw Hill, inc. Madrid, España. 2001.
- ✚ Sapag Chaín, Nassir. "Proyectos de Inversión, Formulación y Evaluación". Editorial Pearson, Prentice may. México. 2006
- ✚ Spellman, Frank R.. "Dewatering Biosolids". Technomic Publishing Company, Inc. 1997.
- ✚ Spinosa, L. & Vesilind, P.A.. "Sludge into Biosolids; Processing, Disposal, Utilization". First Edition. IWA Publishing, London. 2001.
- ✚ U.S Environmental Protection Agency. "Process Design Manual; Surface Desposal of Sewage Sludge and Domestic Septage. Cincinnati, Ohio. September 1995.
Disponible en: <http://www.epa.gov/ORD/WebPubs/sludge.pdf>
- ✚ U.S. Environmental Protection Agency. "Environmental Regulations and Technology, Use and Disposal of Municipal Wastewater Sludge". EPA/625/10-84-003. Septiembre, 1984.

Bibliografía

- ✚ U.S. Environmental Protection Agency. “Environmental Regulations and Technology Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge”. Cincinnati, Ohio. July 2003.

Disponible en: <http://www.epa.gov/Region8/water/biosolids/biosolidsdown/index.html>

- ✚ U.S. Environmental Protection Agency. “Part 503; Implementation Guide”. Cincinnati, Ohio. October 1995.

Disponible en: <http://www.epa.gov/owmitnet/sectbio.htm>