



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza

**PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE LODOS GENERADOS
EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
“CERRO DE LA ESTRELLA”**

T E S I S

Que para obtener el Título de:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

Silvia Celio Hernández

DIRECTOR

I. Q. José Mariano Ramos Olmos

ASESOR

Dr. José Antonio Barrios Pérez



México, D.F., 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ZARAGOZA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

OFICIO: FESZ/JCIQ/079/15

ASUNTO: Asignación de Jurado

Atento (a): Ceilo Hernández Silvia

PRESENTE

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, he propuesto a los siguientes sinodales:

PRESIDENTE	I.Q. GONZALO RAFAEL COELLO GARCÍA
VOCAL	I.Q. JOSÉ MARIANO RAMOS OLMOS
SECRETARIO	M. en C. ANA LILIA MALDONADO ARELLANO
SUPLENTE	DR. JOSÉ ANTONIO BARRIOS PÉREZ*
SUPLENTE	I.Q. JOSÉ LUIS COMPEÁN GUZMÁN*

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
México D.F. a 5 de febrero de 2015

JEFA DE CARRERA

I.Q. DOMINGA ORTIZ BAUTISTA



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer:

A Dios por siempre cuidarme y por permitirme cumplir una más de mis metas, pero sobre todo por darme vida.

A mi madre María Hernández Hernández, a mi padre Martiniano Celio Tomás y a mis hermanos Fortino, Jenaro, Olivia y María Ester, por su apoyo y confianza durante todos estos años de estudios, porque a pesar de los momentos difíciles siempre me dieron ánimo para seguir adelante.

A mis sobrinos María Fernanda, Santiago y Mateo por siempre darme ánimos, hacerme reír y hacer de mi vida una aventura, los amo.

A mis cuñados Judith Ayala y José Jiménez, por su apoyo y paciencia durante estos años que llevamos de conocernos y en los que hemos compartido buenos y malos momentos.

A mis amigas Maresah, Claudia, Elizabeth, Yaneli, Alejandra y Margarita por su apoyo, cariño y amistad durante todos estos años y sobre todo por estar conmigo en los momentos más felices y difíciles de mi vida.

Al I.Q. José Mariano Ramos Olmos, I.Q. José Luis Compeán Guzmán y al Dr. José Antonio Barrios Pérez por su asesoría, apoyo, confianza y paciencia en la elaboración de esta tesis.

Al Ing. Martín Victoria López y al Sistema de Aguas de la Ciudad de México por su apoyo en la elaboración de este trabajo.

A mis sinodales la M. en C. Ana Lilia Maldonado Arellano y al I.Q. Gonzalo Coello García por sus valiosos comentarios en la revisión de esta tesis.

A todos ustedes

MUCHAS GRACIAS!!!



RESUMEN

En la presente Tesis, se pretende dar a conocer un panorama general de los diferentes sistemas de tratamientos de lodos que existen actualmente, con la finalidad de tener las herramientas necesarias para proponer un tren de tratamiento de lodos que sea el más adecuado para tratar los lodos generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Cerro de la Estrella”.

Con este fin, se inicia con la descripción general del sistema de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados que utiliza la planta para tratar las aguas residuales generadas en el Área Metropolitana de la Ciudad de México. Asimismo, se describen de manera general los diferentes sistemas de tratamiento de lodos que existen; a partir de los cuales se realizó un análisis tomando como base las ventajas y desventajas que presenta cada uno de estos, mediante el cual se seleccionaron los procesos más idóneos para conformar los dos trenes de tratamiento que se proponen en este trabajo y cuya principal característica para el primer proceso es la digestión anaerobia mesófila y para el segundo la estabilización con cal.

Ambos procesos fueron propuestos tomando como fundamento lo establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, que regula los límites máximos permisibles de microorganismos patógenos en los biosólidos así como de metales pesados. Por lo que debido a las características que presentan los lodos residuales de la planta, la mejor opción es obtener un biosólido de Clase C, el cual puede ser usado como mejorador de suelos, uso agrícola y forestal.

Por último, se elaboró un análisis financiero utilizando el Valor Presente Neto como método de estimación del costo de inversión y a partir del cual se tomó la decisión de elegir el proceso 1 como tren de tratamiento para tratar los lodos generados en la PTAR “Cerro de la Estrella”, ya que el costo de inversión fue menor con respecto al proceso 2.



CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
JUSTIFICACIÓN.....	2
OBJETIVOS.....	2
CAPÍTULO 1 PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA PLANTA “CERRO DE LA ESTRELLA”	
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Descripción del Proceso de Tratamiento del Agua Residual.....	5
1.2.1 Influyente.....	5
1.2.2 Tratamiento Primario.....	8
1.2.3 Tratamiento Secundario.....	9
1.2.3.1 Bioselector Anóxico.....	9
1.2.3.2 Reactor Biológico.....	9
1.2.3.3 Sedimentador Secundario.....	12
1.2.4 Filtración.....	14
1.2.5 Desinfección.....	15
1.2.6 Cárcamo de Bombeo de Agua Residual Tratada.....	17
1.2.7 Efluente.....	17
1.3 Proceso biológico en el tratamiento de aguas residuales por lodos activados.....	18
CAPÍTULO 2 TRATAMIENTO DE LODOS	
2.1 Definición de lodo residual.....	28
2.2 Tipos de lodos.....	28
2.2.1 Lodo primario.....	28
2.2.2 Lodo secundario.....	28
2.2.3 Lodo terciario.....	28
2.2.4 Lodo químico.....	28
2.2.5 Lodo digerido.....	29
2.3 Importancia del tratamiento de lodos.....	29
2.4 Tipos de tratamiento de lodos.....	30



2.4.1	Espesamiento	33
2.4.1.1	Espesamiento por Gravedad	35
2.4.1.2	Espesamiento por Flotación	37
2.4.1.3	Espesamiento por Centrifugación	39
2.4.2	Estabilización	41
2.4.2.1	Digestión Aerobia	41
2.4.2.2	Digestión Anaeróbica	48
2.4.2.3	Estabilización con cal	55
2.4.2.4	Compostaje	58
2.4.3	Acondicionamiento	63
2.4.4	Deshidratación	68
2.4.4.1	Lechos de secado	69
2.4.4.2	Filtro Prensa	72
2.4.4.3	Filtro Banda	73
2.4.4.4	Filtración a vacío	74
2.4.4.5	Centrífuga	76
2.4.5	Secado Térmico	77
2.4.6	Incineración	78
2.4.6.1	Horno de piso múltiples	79
2.4.6.2	Hornos de Lechos Fluidizados	80
2.4.7	Desinfección	83
2.4.7.1	Pasteurización	83
2.4.7.2	Almacenamiento a largo plazo	84
2.5	Aprovechamiento y disposición final de biosólidos	84
CAPÍTULO 3 CASO DE ESTUDIO – “PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES “CERRO DE LA ESTRELLA”		
3.1	Identificación de los lodos generados en la PTAR “Cerro de la Estrella”.	90
3.2	Análisis técnico de las alternativas de tratamiento de los lodos.	92
3.3	Análisis financiero de las alternativas de tratamiento de los lodos.	96



3.4	Justificación del proceso de tratamiento de lodos seleccionado.....	98
3.5	Descripción del proceso de tratamiento de lodos seleccionado.....	99
3.6	Memoria de cálculo para el diseño del tren de tratamiento de lodos seleccionado.....	104
3.6.1	Espesador por gravedad.....	104
3.6.2	Digestor anaerobio mesófilo.....	108
3.6.3	Deshidratación - Filtro banda	121
3.6.4	Tolva de almacenamiento para biosólidos.....	124
3.7	Recomendaciones para el aprovechamiento de los lodos tratados.....	124
	CONCLUSIÓN	125
	REFERENCIAS	127
	ANEXO I – PLANOS	131
	I-1 Diagrama de flujo de proceso del proceso seleccionado.....	131
	I-2 Layout del tren de tratamiento de lodos seleccionado.....	132
	ANEXO II CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS Y ESTRUCTURAS USADOS PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS.....	133
	ANEXO III TABLAS DE RESULTADOS DEL PROCESO 2.....	143
	ANEXO IV FIGURAS Y TABLAS	146



NOMENCLATURA

ATAD	Digestión aerobia termofílica autotérmica
C_h	Carga hidráulica
C_L	Caudal de lavado
C_{LP}	Concentración de lodos primarios
C_{LA/S}	Concentración de lodo activado/secundario
C_m	Carga másica
C_P	Capacidad calorífica
CS	Carga de sólidos
DBO₅	Demanda biológica de oxígeno
D_P	Dosificación de polímero seco
DQO	Demanda química de oxígeno
DRE	Destruction removal efficiency
D_T	Días de trabajo
ε DBO₅	Eficiencia de remoción de demanda biológica de oxígeno
ε SS	Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos
EPA	Environmental Protection Agency
FR	Filtro rociador
TRH	Tiempo hidráulico de retención
H_T	Horas de trabajo
LAP	Lodo activado purgado
LP	Lodo primario
LS/B	Lodo secundario/biológico
NKT	Nitrógeno total de Kjeldahl
NMP	Número más probable
NOM	Norma Oficial Mexicana
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales
RAS	Relación de adsorción de sodio
SP	Sedimentador primario
SRT	Tiempo de residencia celular
SS	Sólidos suspendidos
SSLM	Sólidos suspendidos en el lico mezclado
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
VPN	Valor presente neto
W_{Lodo}	Ancho de banda
YN	Coefficiente de crecimiento



INTRODUCCIÓN

En México, se generan alrededor de 448 m³/s de aguas residuales, donde 235 m³/s son aguas municipales y 213 m³/s son aguas no municipales (CONAGUA, 2010).

Los sectores que generan mayor cantidad de aguas residuales son la acuicultura, la industria del azúcar, la industria del petróleo, la industria química y otros servicios, cabe destacar que los sectores industriales son los que aportan mayor cantidad de carga contaminada.

Desde finales de 1950, se comenzaron a tratar las aguas residuales que se generaban en el país, debido a esto se desarrollaron una serie de Normas Oficiales Mexicanas, como la NOM-001-SEMARNAT-1996, NOM-002-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997.

En el 2012, CONAGUA publicó que solo el 46.05% de las aguas residuales generadas en México eran tratadas en las 2289 plantas de tratamiento con las que cuenta el país.

Actualmente en el Área Metropolitana de la Ciudad de México, se generan 40 m³/s de aguas residuales, de los cuales solo se tratan 5.2 m³/s, y la otra parte de las aguas son regresadas a la tubería y canales de desagüe.

El Distrito Federal cuenta con 28 plantas de tratamiento de aguas residuales pertenecientes al Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX). El tratamiento secundario en casi todas estas plantas se proporciona mediante los trenes construidos por sedimentación primaria y tratamiento biológico a base de lodos activados. Cabe recordar que el tratar las aguas residuales involucra una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos por lo que, se producen algunos tipos de gases, como dióxido de carbono (CO₂), ácido sulfhídrico (H₂S), metano (CH₄), etc., así como diferentes tipos de elementos patógenos presentes en los lodos, los cuales representan un peligro para el medio ambiente y el ser humano. Con la finalidad de disminuir el impacto de los contaminantes que se tienen en los lodos resultantes del tratamiento de aguas residuales en México se publicó la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, la cual establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes en los biosólidos para su aprovechamiento y disposición final.

De las 28 plantas de tratamiento de aguas residuales solo el 35% de estas cuentan con un sistema de tratamiento de lodos. De entre las plantas de tratamiento de aguas residuales que no tienen un tratamiento de lodos, se encuentra la planta “Cerro de la Estrella” en Iztapalapa, la cual debido a que fue una de las primeras plantas construidas antes de la publicación de la NOM-004-SEMARNAT-2002 en el Distrito Federal, no se contempló el tratamiento de lodos, por lo que, en la presente Tesis se pretende dar una solución a este problema, proponiendo un tratamiento



para los lodos que se generan en esta planta así como identificar las opciones para su reúso o disposición, con la finalidad de poder reducir los efectos contaminantes para el medio ambiente y el ser humano, cumpliendo así con la NOM-004-SEMARNAT-2002.

JUSTIFICACIÓN

La elaboración de esta Tesis tiene como objetivo principal proponer un tratamiento para los lodos que se generan en la planta de tratamiento de aguas residuales “Cerro de la Estrella”, con la finalidad de poder cumplir con la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, así como dar recomendaciones para un mejor uso de los biosólidos que pueda representar un beneficio para la sociedad y que este no sea dañino para el ambiente.

Cabe mencionar que no todas las plantas de tratamiento de aguas residuales con las que cuenta el Distrito Federal tienen un sistema de tratamiento de lodos, ya que algunas de estas plantas fueron construidas antes de la publicación de la NOM-004-SEMARNAT-2002, como es el caso de la planta “Cerro de la Estrella”, por lo que, es necesario proponer un sistema de tratamiento para los lodos, no solo para poder cumplir con la norma como se mencionó anteriormente sino también, porque debido a que estos lodos son generados por un tratamiento biológico contienen una serie de microorganismos patógenos así como un potencial de atracción de vectores de enfermedades, que representan un riesgo para la salud de las personas y contribuyen a la contaminación del medio.

Una vez que se hayan tratado los lodos, estos se podrán disponer o reusar en actividades que brinden un beneficio a la sociedad, por ejemplo, como fertilizante para cultivos o para la rehabilitación de suelos.

OBJETIVOS

- Identificar el tipo de lodo generado en la planta de tratamiento de aguas residuales “Cerro de la Estrella”.
- Proponer un sistema de tratamiento para los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales “Cerro de la Estrella”, con la finalidad de reducir sus efectos contaminantes al medio ambiente y así cumplir con lo establecido en la NOM-004-SEMARNAT-2002.
- Proponer opciones de aprovechamiento, o en su caso disposición, para los biosólidos.

CAPÍTULO 1

PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA PLANTA “CERRO DE LA ESTRELLA”

1.1 Antecedentes

La demanda de agua en el Distrito Federal, durante las últimas décadas se ha incrementado de tal manera que resulta necesario establecer planes para optimizar el manejo, distribución y aprovechamiento; entre ellos se encuentra el enfocado al tratamiento y reúso de las aguas residuales generadas en la Ciudad de México, cuyo objetivo es rescatar volúmenes apreciables de aguas de primer uso sustituyéndolas por aguas residuales tratadas en aplicaciones tales como el riego de áreas verdes, llenado de lagos recreativos, suministro a industrias, recarga del acuífero y a largo plazo para consumo humano. Dentro de estos planes estuvo la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales “Cerro de la Estrella”, ubicada en la Av. San Lorenzo 312, San Juan Xalpa en Iztapalapa, Distrito Federal a un costado del Panteón Civil, la cual en su tiempo fue considerada como una de las plantas más grandes de la República Mexicana, puesta en operación desde 1971; diseñada para alcanzar el nivel de tratamiento secundario mediante el proceso de lodos activados convencional, el tratamiento incluye además, desinfección del efluente mediante cloración.

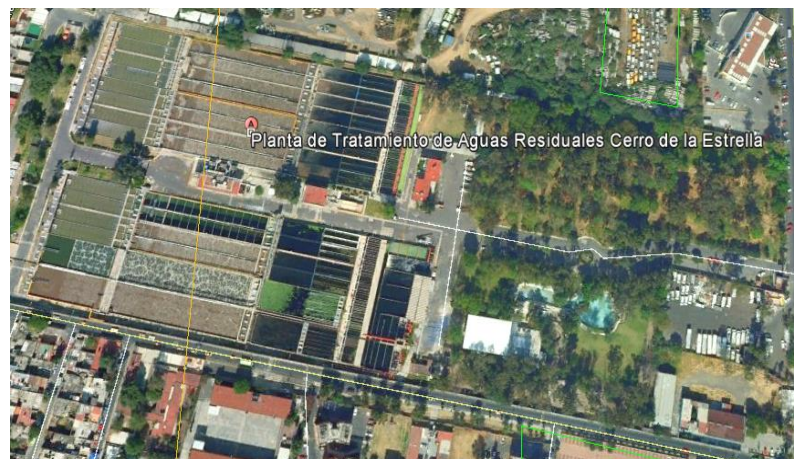


Figura 1.1 Vista aérea de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Cerro de la Estrella”. Tomado de Google Earth, 2014.

La planta en su inicio contaba con una infraestructura civil de $2 \text{ m}^3/\text{s}$, con 2 unidades de proceso a nivel secundario y 4 trenes de tratamiento cada una.

Entre 1984 y 1993, se hizo una ampliación de infraestructura civil a 4 unidades y operacionalmente se elevó la capacidad de diseño a $4 \text{ m}^3/\text{s}$, mismos que por causas ajenas a la operación nunca fueron alcanzados.

En el periodo de 2006-2008 se realizó una inversión de aproximadamente 150 millones de pesos, que estaban destinados a elevar la capacidad operacional real a 3 m³/s, con los que actualmente la planta está trabajando. En el año de 2007, en las cuatro unidades de tratamiento se anexaron bioselectores en la etapa biológica del proceso.

Las modificaciones más recientes que se han hecho en la planta son la instalación de una criba tamiz en el lado sur, que se encarga de eliminar las pequeñas basuras orgánicas e inorgánicas. Así como la eliminación del tratamiento primario en los vasos 9, 10, 11 y 12 pertenecientes a la unidad III, los cuales fueron cambiados a reactores biológicos, para esto se desmantelaron por completo los vasos y se instalaron difusores con membranas para el suministro de aire así como válvulas para la recirculación de lodos. Este sistema se encuentra operando desde diciembre del 2013.



Figura 1.2 Difusores de aire tipo membrana (Reactor Biológico).



Figura 1.3 Válvulas de recirculación de lodos (Reactor Biológico).



Figura 1.4 Reactor Biológico (Vaso 10 y 11).

El objetivo principal de la planta es resolver los problemas de abastecimiento de la Zona de Reserva Ecológica de Xochimilco y de los ejidos agrícolas de la Delegación Tláhuac con un 80% de su producción y el resto es enviado a la zona industrial aledaña a la planta. Por tal motivo las

modificaciones realizadas a la planta se hicieron para cumplir con los límites máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997.

No obstante aún queda pendiente modificar la infraestructura de la planta para el manejo, tratamiento y disposición de los lodos generados durante el proceso de tratamiento del agua residual y de esta forma poder cumplir con lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002.

1.2 Descripción del Proceso de Tratamiento del Agua Residual

Las etapas del proceso de tratamiento que se utiliza actualmente en la planta “Cerro de la Estrella” se pueden observar de manera general en la siguiente figura.

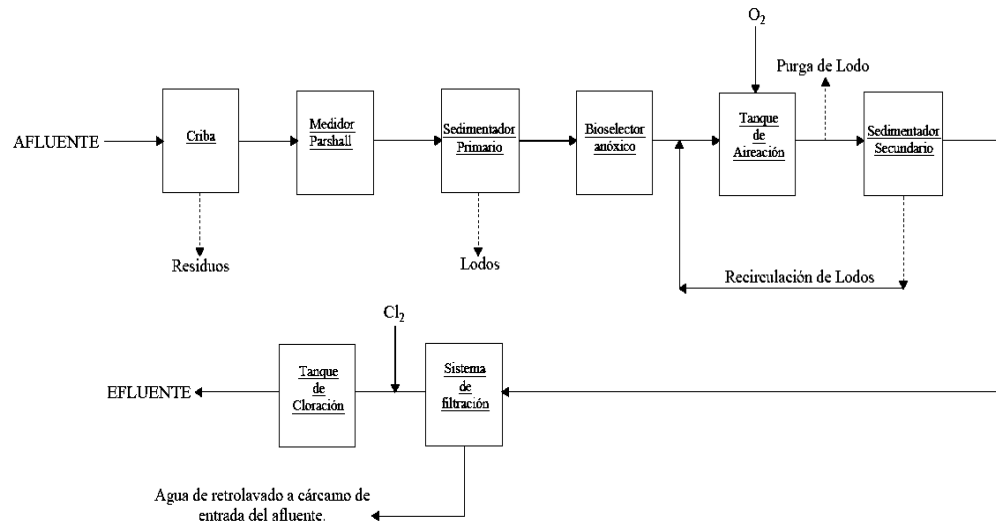


Figura 1.5 Diagrama de Flujo de la planta de tratamiento de aguas residuales “Cerro de la Estrella”.

A continuación se explica de forma más detallada en qué consiste cada una de las etapas del proceso de tratamiento del agua residual.

1.2.1 Influyente

El agua residual obtenida en la conjugación de las aguas domésticas, industriales y pluviales que son enviadas al colector Río de Churubusco a través de los diversos ramales del sistema principal de drenaje, llegan a la estación de bombeo de San José Aculco, donde se somete a un pre-tratamiento cuyo objetivo es la eliminación de sólidos de gran tamaño por medio de rejillas de contención, trituradores de basura y cribas que trabajando en conjunto logran desmenuzar y homogenizar la materia orgánica contenida en la materia prima; posteriormente es bombeada en

un recorrido de 8 km, hasta llegar a la planta “Cerro de la Estrella”, donde esta ingresa como influente para el proceso de tratamiento que dura alrededor de 12 a 14 horas.



Figura 1.6 Vista aérea de la Estación de Bombeo de San José Aculco. Tomado de Google Earth, 2014.

El proceso de tratamiento inicia cuando el influente entra directamente a la caja de llegada o cárcamo donde recibe de 2500 a 3000 l/s de agua residual, mismas que desembocan en dos canales abiertos que se localizan en los extremos laterales de la caja de llegada con una longitud individual de 50 m, en donde se disminuye la velocidad del agua mediante un salto hidráulico.



Figura 1.7 Caja de llegada del influente.

El agua residual pasa por una criba tamiz que se encuentra en el lado sur, este equipo se encarga de eliminar las pequeñas basuras orgánicas e inorgánicas desde 6 mm y más. Cabe mencionar que al agua residual que se envía a tratamiento hacia las diferentes unidades por medio de los dos canales abiertos se le suministra un químico con la finalidad de disminuir los olores que produce la acumulación de este, evitando así dañar la salud de las personas que residen cerca de la planta.



Figura 1.8 Criba Tamiz

Al final de cada canal abierto se encuentra una caja distribuidora, de forma pentagonal, cada una distribuye el influente a su respectiva unidad de tratamiento de lodos activados convencional. Para medir el caudal del influente en cada canal se encuentra instalado, a 15 m de distancia con respecto a la caja de llegada, un medidor Parshall que registra directamente el gasto de agua en litros/segundo.



Figura 1.9 Medidor Ultrasónico.

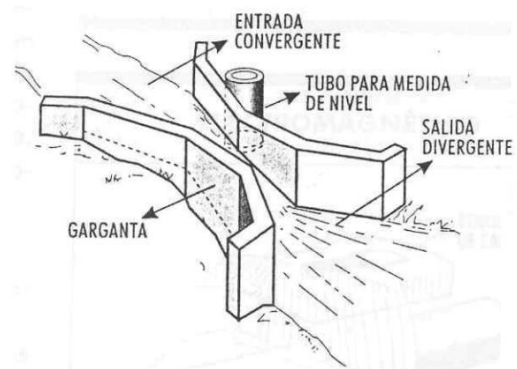


Figura 1.10 Canal Parshall.

1.2.2 Tratamiento Primario

El agua residual pasa al tratamiento primario cuyo objetivo es la eliminación de sólidos de fácil sedimentación, así como grasas, aceites y material flotante. Esto se logra reduciendo la velocidad del agua, mediante una pantalla deflectora, a la entrada del tanque de sedimentación primaria y proporcionando tiempo suficiente para que los sólidos suspendidos sedimenten por gravedad.



Figura 1.11 Sedimentador primario (Unidad II).

El tratamiento primario para cada unidad consta de un tanque de forma rectangular dividido en cuatro módulos con alimentación independiente, flujo horizontal y remoción mecánica e hidráulica de lodos, pero con vertedor y canaleta de recolección de efluente común.



Figura 1.12 Rastras y tolvas del sedimentador primario (Unidad II).

La recolección de lodos sedimentables y la eliminación de natas se realizan por medio de rastras, las cuales se encuentran sujetas a una cadena sinfín accionada por un motorreductor de $\frac{3}{4}$ HP. El movimiento horizontal de estas rastras, parcialmente sumergidas, permite el arrastre de las grasas, aceites y sólidos flotantes hacia una canaleta superficial, común para los cuatro módulos, localizada un poco antes de la salida de los tanques (a 43.60 m del punto de alimentación de agua cruda al eje de la canaleta) para disponerlas finalmente hacia el drenaje por medio de su válvula respectiva. Por otra parte, este movimiento las barre lentamente del fondo del tanque y los lodos

sedimentados son enviados hacia las 12 tolvas (3 por cada vaso o módulo) donde estos son eliminados del proceso mediante una purga; estas están ubicadas en la parte inferior de la entrada del tanque, de donde son conducidas (ya bajo la denominación de lodos primarios) hacia el drenaje a través de las 12 válvulas correspondientes.

Generalmente, las rastras son fabricadas con cloruro de polivinilo (PVC) o con vigas de madera recubriéndolas con microlastic o algún otro impermeabilizante. En el extremo de salida cada uno de los tanques se localiza un vertedor común para sus cuatro módulos a través del cual el agua, una vez que ha recibido el tratamiento primario, pasa a la subsecuente etapa de tratamiento por gravedad.

1.2.3 Tratamiento Secundario

1.2.3.1 Bioselector Anóxico

Una vez que el agua residual sale del tratamiento primario pasa por una zona anóxica antes de ingresar al proceso biológico. La principal función de esta zona anóxica es estresar a los microorganismos generando falta de oxígeno y al mismo tiempo eliminar microorganismos filamentosos, conservando una mezcla homogénea de microorganismos. En esta etapa del tratamiento se seleccionan los microorganismos más fuertes que serán necesarios para llevar a cabo el proceso biológico. El bioselector cuenta con unas aspas, las cuales tienen la función de mezclar los lodos de recirculación con el agua proveniente del sedimentador primario.



Figura 1.13 Bioselector anóxico (Unidad III).

1.2.3.2 Reactor Biológico

Su propósito es proveer los requerimientos de oxígeno, nutrientes, mezclado y otras condiciones ambientales, para que los microorganismos existentes en el agua, degraden la materia orgánica contenida en ella, para ello se dispone de los siguientes equipos: el tanque de aireación, sopladores, aspersión para rompimiento de espuma, tanque de sedimentación secundaria y dos

tipos sistemas de recirculación de lodos, para las unidades I, II y III se utiliza sistema air-lift y para la unidad IV un sistema clariback.



Figura 1.14 Sistema Clariback (Unidad IV).



Figura 1.15 Sistema Air-lift (Unidad II).

Para el suministro de aire la planta cuenta con dos salas de sopladores; la sala II proporciona aire solo para la unidad IV y la sala I se encarga de suministrar aire a las otras 3 unidades. Cada unidad cuenta con un tanque de aireación dividido en cuatro módulos de forma rectangular con alimentación independiente y canaleta de recolección de efluente común. En la parte central de cada tanque se encuentra localizado un canal, a través del cual son conducidos los lodos de recirculación provenientes del sedimentador secundario. Estos lodos descargan de manera independiente a cada uno de los módulos de los tanques de aireación a través de una tubería provista de una boquilla Kenisson.

El sistema de aireación es por difusión de aire comprimido, para lo cual, en la planta se tienen 3 sopladores con una capacidad de 36,000 m³/h cada uno. Estos sopladores cuentan con un sistema de enfriamiento (intercambiador de calor), tres manómetros con escala de 0-10 kg/cm³, 8 termómetros con escala de 0-150 °C, una bomba auxiliar para efectuar la lubricación, un motor con una válvula de mariposa de 20 in de diámetro para regular la salida de aire y un filtro.



Figura 1.16 Soplador Multietapa (Hoffman). Sala de Sopladores II.



Figura 1.17 Soplador tipo Turbina (Turblex). Sala de Sopladores I.

Por otra parte, cada tanque cuenta con 60 cabezales de distribución de aire (15 en cada módulo con 48 difusores cada uno) los difusores son del tipo de tubos perforados cubiertos con saran, destinados a producir burbujas pequeñas; cada cabezal tiene en su base una válvula que permite regular la cantidad de aire aplicada, lo que ayuda a controlar cualquier desajuste en la repartición de aire en los difusores. Debido a la presencia de agentes surfactantes y a la agitación ocasionada por la difusión de aire comprimido, se tiene la presencia de espuma en el tanque de aireación, por lo que para su control, cada unidad cuenta con una serie de boquillas de aspersion montadas a lo largo del borde superior del tanque de aireación. Por estas boquillas se rocía agua tratada continuamente o a intervalos de tiempo (según se requiera), lo que hace que la espuma se destruya a medida que se forme.



Figura 1.18 Tanque de aireación con presencia de espuma (Unidad III).

El lodo activado compuesto por sepas protozoarias (Ciliados, flagelados) y rotíferos se estabiliza de manera biológica juntamente con el agua residual, oxidando la materia orgánica y tratando de mantener la masa bacteriológica bajo condiciones 100% aerobias, para lograrlo se inyecta aire por medio de un sistema de difusión instalado en el fondo del tanque reactor, como se mencionó anteriormente. Esta actividad se desarrolla en un lapso de 6 a 7 horas aproximadamente.

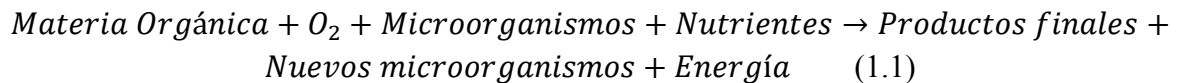


Figura 1.19 Reactor Biológico (Unidad III).



Figura 1.20 Difusores de aire del reactor biológico (Unidad I).

El mecanismo de degradación aerobia de la materia orgánica que sigue el proceso es:



En este proceso a medida que la población de microorganismos aumenta, se agrupan y forman flóculos para producir una masa activa llamada *lodo activado*, el cual sedimentará en la unidad subsiguiente del sistema. Es importante mantener la población de microorganismos en un determinado nivel, así como la concentración de sólidos en suspensión en el licor mezclado (SSLM), para llegar a un equilibrio entre la carga orgánica a eliminar y la cantidad de microorganismos necesarios para que se elimine dicha carga.

Una vez que la materia orgánica ha sido suficientemente oxidada, se requiere un tiempo de retención del agua en el reactor, ya que el licor mezclado pasará al sedimentador secundario o clarificador, donde los lodos floculados se sedimentarán, consiguiendo así separar el agua clarificada de los lodos. Los lodos sedimentados son recirculados de nuevo al reactor biológico para mantener en el mismo una concentración suficiente de microorganismos. El excedente de lodos, se extrae del sistema y se desechan. Esta etapa es considerada como el corazón de la planta por ser la más importante del proceso.

1.2.3.3 Sedimentador Secundario

Su propósito es efectuar la separación de los lodos activados presentes en el licor mezclado produciendo influente clarificado. Por lo que, cada unidad de tratamiento cuenta con un tanque sedimentador de forma rectangular, dividido en cuatro módulos o vasos con alimentación independiente, flujo horizontal, y remoción mecánica e hidráulica de lodos.



Figura 1.21 Sedimentador secundario (Unidad III).

En las unidades I, II y III, los lodos son recolectados por medio de un sistema de rastras, las cuales se encuentran sujetas a una cadena sinfín accionada por un motorreductor de $\frac{3}{4}$ HP. Las

rastras, al pasar lentamente rozando el fondo del tanque, van arrastrando los lodos hacia las 12 tolvas (3 por cada módulo), localizadas en la parte inferior del extremo de entrada del tanque, de donde se extraen, por medio de presión de aire (sistema air-lift), para ser recirculados a los módulos de aireación.

La purga del exceso de lodos se realiza directamente del canal de recolección de lodos, localizado en la parte superior del extremo de entrada del tanque, mediante la apertura de sus válvulas correspondientes.



Figura 1.22 Motorreductor (Sedimentador secundario de la



Figura 1.23 Canaleta de lodos y sistema air-lift (Unidad III).

En la unidad IV, los lodos son recolectados mediante un sistema de clariback, este es un equipo que tiene unas boquillas en la parte inferior mediante la cual succiona los lodos del fondo de los sedimentadores secundarios y por sifón los envía a una canaleta que se encuentra a un costado del sedimentador secundario para que estos sean enviados de regreso a los reactores biológicos de manera que la carga de materia orgánica no disminuya y el proceso funcione correctamente. Este equipo también cuenta con un sistema de poleas las cuales le permiten moverse a través del sedimentador, así como unos sensores que le indican cuando detenerse y regresar a su función.



Figura 1.24 Canaleta de descarga y recirculación de lodos (Unidad IV).



Figura 1.25 Sensores del sistema Clariback (Unidad IV).



Figura 1.26 Sistema clariback en el sedimentador secundario de la Unidad IV.

En los sedimentadores secundarios se tiene mayor longitud que en los sedimentadores primarios, por lo que, se opera a bajas cargas en vertedero (aproximadamente 10 veces menos que en un sedimentador primario de iguales dimensiones).

En esta etapa, cuando los microorganismos han estado el tiempo requerido en el licor mezclado (mezcla de lodo, aire y materia prima) pasa a una segunda sedimentación con la intención de separar las mezclas obtenidas, recuperando la biomasa y dejando fluir el agua hacia los vertederos en “V” (placas metálicas conocidas como crestas), la biomasa se recupera a través de un sistema de rastreo ubicado en la parte media y del fondo del tanque y es llevada a la tolva receptora para ser recirculada a la parte alta del bioselector.



Figura 1.27 Clarificador de la unidad



Figura 1.28 Estructura interna del clarificador de la unidad I.

1.2.4 Filtración

El sistema de filtración está integrado por 2 capas de material filtrante que son de arena y grava sílica soportados por una placa de material denominado porex que nos da más capacidad filtrante, la intención de este filtro es seguir eliminando sólidos suspendidos y coloides que no fueron retenidos en las etapas anteriores. Cuando el medio filtrante se satura se lleva a cabo un

retrolavado automático que inyecta aire y agua al mismo tiempo, con la intención de limpiar el filtro. El producto del retrolavado es reciclado al inicio del proceso para su tratamiento.

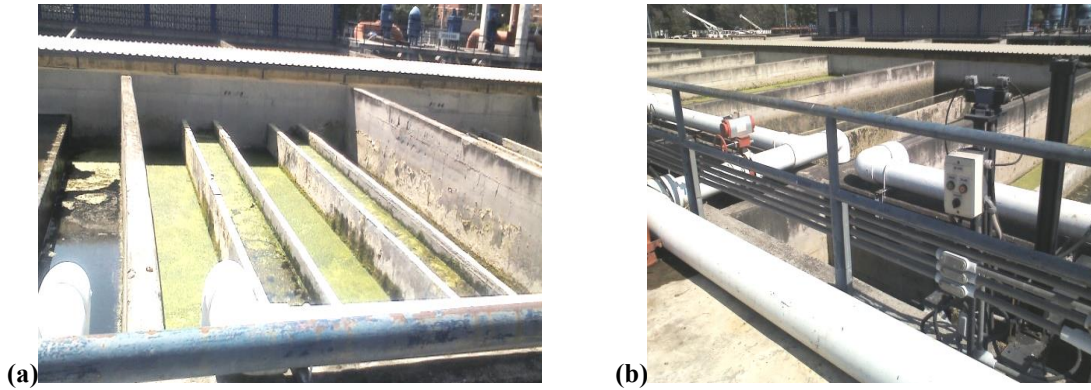


Figura 1.29 Sistema de filtros (a) y sistema de retrolavado (b).

1.2.5 Desinfección

El propósito de esta etapa es la eliminación de la mayor cantidad posible de bacterias patógenas, lo cual se logra adicionando una solución de cloro gas en agua al efluente del sedimentador secundario. Para este fin la planta cuenta con un tanque de contacto de cloro común para las 2 unidades. Este tanque está provisto de un canal de recolección de agua con tratamiento secundario y de una serie de mamparas colocadas a lo largo del tanque, de manera tal que se tenga el tiempo de retención necesario (15 minutos como mínimo).



Figura 1.30 Tanque de contacto de cloro.

La inyección de la solución de cloro se lleva a cabo directamente en la entrada del tanque y las mediciones del cloro residual y organismos coliformes en la salida del mismo. Este cloro se puede extraer de los cilindros (con capacidad de 908 kg) en forma de gas o líquido.



Figura 1.31 Tanques de almacenamiento de cloro gas.

En el caso de la planta, se utiliza el cloro gas, este se mezcla directamente con agua tratada y se inyecta en el tanque de contacto.



Figura 1.32 Sistema de mezcla del cloro gas (Sala de cloración).

El control y ajuste se realiza mediante un equipo dosificador manual a través del rotámetro situado en la parte frontal del equipo de dosificación, con el que se establece la cantidad adecuada de cloro según las características que presente el efluente.



Figura 1.33 Rotámetro (Sala de cloración).

1.2.6 Cárcamo de Bombeo de Agua Residual Tratada

El agua tratada es conducida del cárcamo de bombeo a la red de distribución, a través de 5 bombas de las cuales 3 (con capacidad de 300 HP cada una) distribuyen agua tratada hacia los canales de Xochimilco y las otras 2 (con capacidad de 200 HP cada una) hacia los camellones de la Calzada Ignacio Zaragoza.



Figura 1.34 Cárcamo de bombeo de agua tratada para Xochimilco y Zona industrial.



Figura 1.35 Cárcamo de bombeo de agua tratada para la Zona de Zaragoza.

1.2.7 Efluente

En promedio en la planta se tratan 2 m³/s al día de agua residual con lo que se producen alrededor de 1.94 m³/s de agua tratada, la cual se distribuye hacia los canales de Xochimilco, a los camellones de la Calzada Ignacio Zaragoza y a la zona industrial aledaña a la planta.

La calidad del agua tratada que se produce en esta planta debe cumplir con lo establecido en la NOM-003-SEMARNAT-1997, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, estas especificaciones son:

Tabla 1.1 Límites máximos permisibles de contaminantes.

Tipo de reúso	Promedio anual				
	Coliformes Fecales NMP/100 ml	Huevos de Helmintho (h/l)	Grasas y aceites mg/l	DBO ₅ mg/l	SST mg/l
Servicios al público con contacto directo.	240	≤ 1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional.	1,000	≤ 5	15	30	30

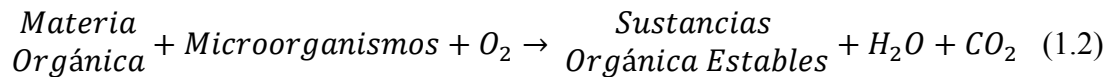
Tomado de la NOM-003-SEMARNAT-1997.



1.3 Proceso biológico en el tratamiento de aguas residuales por lodos activados.

Como resultado del tratamiento del agua residual además de obtenerse agua tratada como producto final, durante el proceso también se producen lodos primarios y secundarios, los cuales en la actualidad no son tratados sino descargados al drenaje. Las características que presentan los lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Cerro de la Estrella” se muestran en la Tabla 3.1.

El proceso de Lodos Activados consiste en la biodegradación de una parte de la materia orgánica contenida en el agua residual, realizada por microorganismos que se han adaptado a utilizarla como alimento y produciendo, a partir de ella compuestos estables, como puede observarse en la siguiente ecuación:



Durante el proceso biológico los microorganismos tienen como objetivo la coagulación y eliminación de sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica presente, y en muchos casos la eliminación de nutrientes como, nitrógeno y fósforo.

Los microorganismos pueden ser:

- *Aerobios* (necesitan oxígeno libre).
- *Anaerobios* (no requieren oxígeno libre).
- *Facultativos* (crecen con o sin oxígeno).

Para que los microorganismos puedan sobrevivir y reproducirse durante todo el proceso de tratamiento del agua residual requieren de:

- Una fuente de energía para crecer, vivir y desarrollarse.
- Una fuente de carbono para la síntesis de nuevo material celular.
- Elementos inorgánicos como nitrógeno, fósforo, azufre, potasio, calcio y magnesio.
- Una fuente de oxígeno, si los microorganismos son aerobios o ausencia de él si son anaerobios.

La forma en que los microorganismos obtienen el carbono y la energía que necesitan para su buen desarrollo hacen que estos sean clasificados de diversas maneras (Ver Tabla 1.2).

Tabla 1.2 Clasificación de los organismos según sus fuentes de energía y de carbono.

Organismo	Fuente de energía	Fuente de carbono
Autótrofos		
Fotoautótrofos	Luz	CO ₂
Quimioautótrofos	Reacción inorgánica de óxido – reducción	CO ₂
Heterótrofos		
Quimioheterótrofos	Reacción orgánica de óxido – reducción	Carbono orgánico
Fotoheterótrofos	Luz	Carbono orgánico

Tomado de Metcalf&Eddy, 1977.

Dentro del proceso biológico del tratamiento de aguas residuales es importante saber cuáles son las condiciones en la que los microorganismos se desarrollan o mueren, lo cual permitirá establecer los parámetros que se deben controlar para que el proceso se lleva a cabo correctamente. Uno de los factores que debe mencionarse en esta etapa del proceso es el *crecimiento microbiano*, el cual se entiende como el aumento del número de células o el aumento de la masa microbiana, que ocurre en un determinado tiempo (puede ser de minutos o días).

El crecimiento microbiano tiene cuatro fases, estas son:

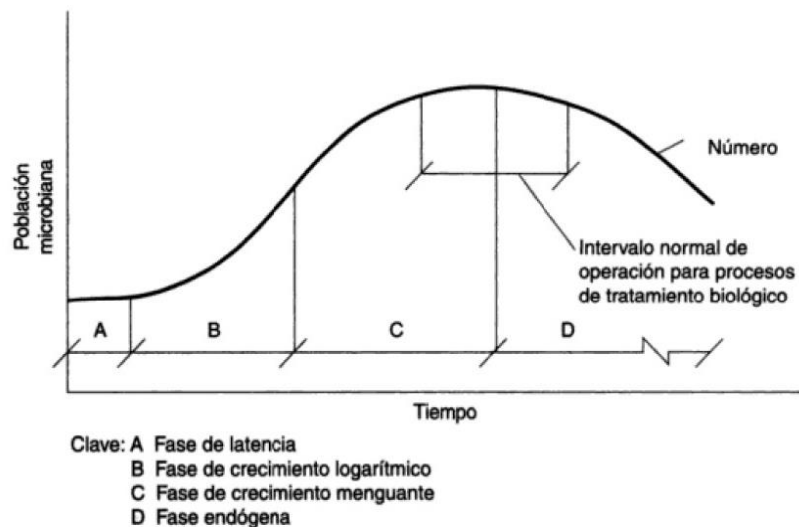


Figura 1.36 Crecimiento microbiano en un cultivo discontinuo. Tomado de Metcalf&Eddy, 1977.

- A. *Fase de latencia (Lag o adaptación)*. Durante este periodo los microorganismos comienzan a adaptarse a las condiciones del medio en el que se encuentran y presentan un crecimiento lento.
- B. *Fase exponencial o de crecimiento logarítmico*. En este periodo las células se dividen y se multiplican en función del tiempo de generación de esta especie y de su capacidad para



procesar alimento. Dado que las células se duplican, existe una relación lineal entre el tiempo y el número de elementos.

- C. *Fase estacionaria o de crecimiento menguante.* En esta fase la población permanece más o menos estacionaria y constante. Esto se atribuye a que las células han consumido el sustrato y/o los nutrientes que se encontraban inicialmente o que el crecimiento de nuevas células es contrarrestado por la muerte de las células existentes.
- D. *Fase de muerte o respiración endógena.* Durante esta fase, la tasa de muerte de las bacterias excede a la producción de células nuevas. Esto se debe a la acumulación de productos tóxicos y a la falta de nutrientes.

La rapidez de crecimiento microbiano varía directamente con la cantidad de alimento disponible. En un *cultivo discontinuo* con bastante alimento la población microbiana, después de un periodo de latencia inicial, crece con rapidez a una velocidad logarítmica. A medida que el alimento desaparece, el crecimiento se retarda hasta que, en un punto determinado, se detiene y el número de células que se produce, se equilibra con el número de células que mueren. Cuando el sustrato se ha agotado, el número de microorganismos disminuye conforme las células viejas se descomponen y liberan sus nutrientes para ser utilizados por microorganismos nuevos (Figura 1.36).

En un *proceso biológico continuo*, el sistema opera normalmente en un punto determinado de la curva de crecimiento hacia el final de la fase de crecimiento endógena, en donde las células utilizan su propio protoplasma para obtener energía. La utilización de la fase de crecimiento logarítmico en el tratamiento de aguas residuales no ha resultado práctica, porque la eliminación de sustrato es incompleta y no se ha encontrado un medio económico para separar la población microbiana del líquido. Los microorganismos que se pueden encontrar en el agua residual son innumerables, pero de suma importancia, ya que de estos depende el éxito del proceso de tratamiento.

Tabla 1.3 Principales microorganismos patógenos y parásitos presentes en las aguas residuales.

Microorganismos	Enfermedad producida
Bacterias	
<i>Salmonella spp.</i>	Salmonelosis (alimento contaminado), fiebre tifoidea.
<i>Shigella spp.</i>	Disentería bacilar.
<i>Yersinia spp.</i>	Gastroenteritis aguda (incluyendo diarrea y dolor abdominal).
<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
<i>Escherichia jejini</i>	Gastroenteritis
<i>Escherichia coli</i>	Infecciones intestinales y extra intestinales generalmente graves, tales como infecciones del aparato excretor, vías urinarias, cistitis, meningitis, peritonitis, mastitis, septicemia y neumonía Gram-negativa.
Virus	
Polivirus	Poliomielitis



Coxsacovirus	Meningitis, neumonía, hepatitis, fiebre, etc.
Virus hepatitis A	Infección de hepatitis.
Rotavirus	Gastroenteritis aguda con severa diarrea.
Virus Norwalk	Infecciones respiratorias, gastroenteritis.
Retrovirus	Infecciones respiratorias, gastroenteritis.
Protozoarios	
<i>Cryptosporidium</i>	Gastroenteritis
<i>Entamoeba histolytica</i>	Enteritis aguda.
<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis (incluyendo diarrea, calambres abdominales, pérdida de peso).
<i>Balantidium coli</i>	Diarrea y disentería.
<i>Toxoplasma gondii</i>	Toxoplasmosis
Helmintos	
<i>Áscaris lumbricoides</i>	Problemas digestivos y nutricionales, dolor abdominal, vómito, insomnio.
<i>Áscaris suum</i>	Produce síntomas como: tos, dolor de pecho y fiebre, dolor abdominal, diarrea, anemia y pérdida de peso.
<i>Trichuris trichiura</i>	Fiebre, dolor abdominal, dolor muscular, síntomas neurológicos.
<i>Toxocara canis</i>	Nerviosismo, insomnio, anorexia, dolor abdominal, trastornos digestivos.
<i>Taenis solium</i>	Taeniasis.
<i>Necantor americanus</i>	Anquilostomiasis
<i>Hymenolepis nana</i>	Hymenolepiasis

Adaptado de la Ref. 27.

Así como las aguas residuales pueden contener una serie de microorganismos patógenos, los lodos provenientes del tratamiento de dicho proceso (purga de lodos primarios y secundarios) también pueden acarrear estos diferentes microorganismos. El lodo está constituido principalmente de bacterias y en menor proporción de hongos, algas, protozoarios, rotíferos y larvas de insectos. Las bacterias y hongos se encargan de utilizar como alimento el material orgánico soluble y coloidal.

Los principales microorganismos patógenos que se pueden encontrar en los lodos residuales son virus, bacterias, protozoarios y helmintos; estos organismos son capaces de sobrevivir a diferentes ambientes hostiles que presenten cambio de pH, temperatura, limitación de nutrientes, etc. Estos agentes patógenos, si bien provienen de las aguas residuales, alcanzan concentraciones más altas en los lodos debido a su acumulación, ya que el volumen de los lodos es más pequeño que el volumen del agua a partir del cual fueron originados dichos lodos.

❖ Bacterias

Son organismos microscópicos unicelulares, se reproducen por fisión binaria, aunque algunas especies se reproducen sexualmente y se caracterizan por su forma, tamaño, estructura y disposición celular. No toleran los niveles de pH por encima de 9.5 o por debajo de 4, el pH óptimo es de entre 6.5 y 7.5.

Las bacterias son esenciales en la descomposición y estabilización de la materia orgánica, tanto en la naturaleza como en las plantas de tratamiento.

Dentro de la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, se encuentran establecidos los límites máximos permisibles de coliformes fecales, *Salmonella spp* y huevos de helminto que debe haber en el lodo o biosólidos.

Los *coliformes fecales* son microorganismos con una estructura parecida a la de una bacteria común que se llama *Escherichia coli* y se transmiten por medio de los excrementos.

La *Escherichia* es una bacteria que se encuentra normalmente en el intestino del hombre y en el de otros animales. Hay diversos tipos de *Escherichia*; algunos no causan daño en condiciones normales y otros pueden incluso ocasionar la muerte. Se transmiten, entre otras vías, a través de las excretas y comúnmente por la ingestión o el contacto con agua contaminada. (Ver Fig. 1.40)

La *Salmonella spp* son bacilos móviles por sus flagelos peritricos, que fermentan de manera característica glucosa y manosa sin producir gas (menos lactosa ni sacarosa). La mayoría produce sulfuro de hidrógeno (H_2S). A menudo, son patógenos para el hombre y los animales cuando se ingieren, ocasionan fiebre tifoidea y enterocolitis (conocida también como gastroenteritis). (Ver Fig. 1.40)

❖ Helmintos

Son animales invertebrados de cuerpo alargado con simetría bilateral y órganos definidos, sin extremidades, con reproducción sexuada durante el estadio adulto y con un tamaño variable que oscila entre décimas de milímetros a varios metros. Los helmintos pueden dividirse en tres grupos:

- Anélidos o gusanos segmentados.
- Platelminos o helmintos planos.
- Nematelminos o helmintos redondos.

El huevo y larva de los helmintos son resistentes a varias condiciones ambientales y métodos tradicionales de desinfección, pero pueden ser removidos por sedimentación, coagulación y floculación, filtración, humedales y lagunas de estabilización. La larva viva tal como la

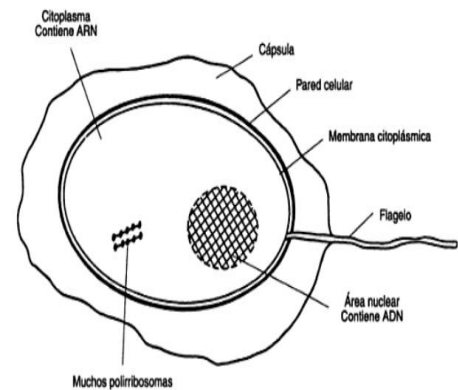


Figura 1.37 Diagrama esquemático de una célula bacteriana típica. Tomado de J. Glynn Henry y W. Heinke Gary, 1999.

encontramos no es patógena, el estadio más efectivo y resistente a los procesos convencionales de desinfección es durante la forma de huevo. (Ver Fig. 1.40)

Los helmintos parasitan al ganado, perros, gatos y a todo tipo de animales (artrópodos, peces, reptiles, aves, mamíferos, etc.) en todo el mundo. Afectan los órganos internos (el hígado, el intestino, el estómago, los pulmones, etc.) en los que encuentran los nutrientes que necesitan para sobrevivir y reproducirse. Por ello forman parte del grupo de los endoparásitos (o parásitos internos) en contraposición a los que parasitan el exterior del cuerpo que se denominan ectoparásitos (moscas, garrapatas, piojos, etc.). Las infecciones con helmintos reciben el nombre genérico de helmintiasis.

En México, la helmintiasis intestinal es un problema de salud pública (cerca del 33% de la población esta parasitada). Las infecciones por *Ascaris lumbricoides* es el más común de los helmintos, afectando sobre todo a las zonas rurales debido a que las deficientes condiciones socioeconómicas e higiénicas.

❖ Algas

Son protistas fotosintéticos, unicelulares o multicelulares, autótrofos que tienen la capacidad de producir oxígeno por medio de la fotosíntesis, además son vitales para la ecología del medio ambiente del agua. Las algas representan un serio inconveniente en las aguas superficiales, ya que cuando las condiciones son favorables pueden reproducirse rápidamente cubriendo la superficie del efluente.

❖ Hongos

Son protistas heterotróficos, no fotosintéticos y multicelulares, utilizan la materia orgánica como fuente de energía y carbón, modifican el pH por sí mismos y tiene un bajo requerimiento de nitrógeno, por lo que tienen un papel muy importante en el tratamiento biológico de las aguas y en el composteo de sólidos orgánicos. La mayoría de los hongos son aerobios y tienen la capacidad de crecer en condiciones de baja humedad, además pueden tolerar un ambiente con un pH relativamente bajo. El pH óptimo para la mayoría de las especies es de 5.6; el rango es de 2 a 9.

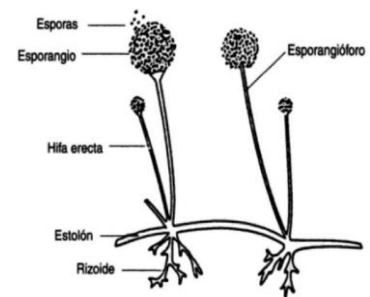
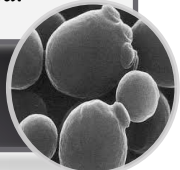
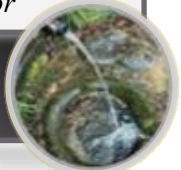



Figura 1.38 Esquema de un hongo. Tomado de J. Glynn Henry y W. Heinke Gary, 1999.

Los hongos también tienen un bajo requerimiento de nitrógeno, necesitan aproximadamente la mitad que una bacteria. La capacidad de los hongos para sobrevivir en condiciones de bajo pH y escasez de nitrógeno, junto con su capacidad de degradar la celulosa, hace de ellos un factor

importante en el tratamiento biológico de las aguas industriales y en el composteo de residuos sólidos orgánicos. Los hongos se dividen en:

<ul style="list-style-type: none">• Son hongos microscópicos unicelulares que son importantes por su capacidad para realizar la descomposición mediante fermentación de diversos cuerpos orgánicos, principalmente los azúcares o hidratos de carbono, produciendo distintas sustancias.• Estas se reproducen de forma asexual por fisión binaria o por gemación, y sexualmente por formación de ascosporas. Son facultativas, es decir, crecen de forma aeróbica como anaeróbica.	<ul style="list-style-type: none">• Son hongos filamentosos que crecen extendiendo largas estructuras como aspectos de hilos llamadas <i>hifas</i>, las cuales forman el micelio. El moho crece mejor en condiciones cálidas, mojadas y húmedas, y se propaga y reproduce mediante esporas. Los tipos de mohos más comunes son:<ul style="list-style-type: none">• <i>Cladosporium</i>• <i>Penicillium</i>• <i>Alternaria</i>• <i>Aspergillus</i>• <i>Mucor</i>	<ul style="list-style-type: none">• Son los esporocarpos, o cuerpos fructíferos, de un conjunto de hongos pluricelulares (basidiomicetos) que incluye muchas especies. .
<p>Levaduras</p> 	<p>Mohos</p> 	<p>Setas</p> 

❖ Virus

Son parásitos que necesitan de otro para poder vivir, ya que no contienen enzimas internas y por lo tanto no pueden crecer o metabolizarse por su propia cuenta; una vez que obtienen lo que necesitan de otro, producen nuevos virus y las células huésped se rompen liberando nuevas partículas de virus que pueden infectar nuevas células. Los virus más pequeños tienen un tamaño de 10 a 250 nm (1nm = 10⁻³ μm). Muchos virus que producen enfermedades al hombre son excretados en las heces humanas.

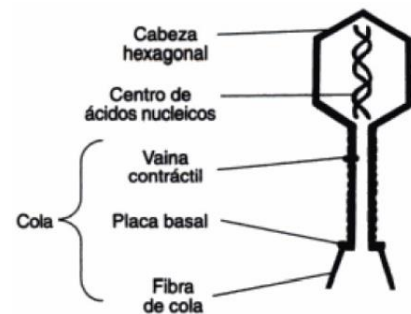


Figura 1.39 Esquema de virus (Bacteriófago). Tomado de J. Glynn Henry y W. Heinke Gary, 1999.



❖ Protozoarios

Son microorganismos unicelulares no fotosintéticos. La mayoría de los protozoarios son heterótrofos aerobios, aunque algunos pocos son anaerobios. Estos organismos viven en medios líquidos, son capaces de moverse, son depredadores de bacterias como una fuente de energía y se reproducen por bipartición (la célula se divide en dos). Algunos de ellos son parásitos capaces de causar enfermedades en animales y humanos como la Amibiasis o Disentería Amibiana, la Malaria, la Giardiasis, la Criptosporidiosis, etc. (Ver Fig. 1.40)

Tabla 1.4 Algunos rangos típicos de temperatura para varias bacterias.

Tipo	Temperatura, °C	
	Rango	Óptimo
Psicrófilas ^a	-10 - 30	12 - 18
Mesófilas	20 - 50	25 - 40
Termófilas	35 - 75	55 - 65

^a También llamado Criófila.
Nota: $1.8(^{\circ}\text{C}) + 32 = ^{\circ}\text{F}$

Tomado de Metcalf&Eddy, 1977.

Los protozoarios más importantes en las aguas residuales son las amebas, los flagelados y los ciliados fijos y de vida libre. Son básicos en el funcionamiento de los procesos biológicos de tratamiento.

Los **flagelados o mastigóforos** (*Mastigophora*) son organismos que sirven para el traslado y captura del alimento y pueden ser receptores sensoriales. Muchos flagelados llevan vida libre y solitaria, algunos son sedentarios y otros forman colonias que comprenden desde pocos hasta miles de individuos; *Euglena*, *Volvox*, *Giardia*.

Los **ciliados** (*Ciliophora*) son los protozoarios más importantes en los sistemas de tratamiento y autopurificación de corrientes. Estos pueden ser móviles o sésiles y la mayoría se alimenta de organismos pequeños (bacterias, algas u otros protozoos). Se dividen en dos grupos: los anclados y los nadadores libres: Los nadadores libres se mueven a través del líquido metabolizando la materia orgánica sólida tan rápido como pueden, debido a ello, consumen gran cantidad de energía. Los ciliados anclados están unidos a flóculos por medio de un tallo, como su movimiento es limitado, requieren menos energía y alimento. *Paramecium*, *Vorticella*.

Las amebas son organismos unicelulares móviles mediante pseudópodos (protuberancias no permanentes que emergen del cuerpo y le permiten moverse y alimentarse). Se reproducen de forma binaria y se alimentan básicamente de bacterias.

Hay especies de vida libre que viven en plantas acuáticas, tierra húmeda, etc. y otras que son parásitas de animales. Entre las parásitas destacan los géneros *Entamoeba*, *Endolimax* y

Iodamoeba, que parasitan fundamentalmente el tracto gastrointestinal. La *Entamoeba Histolytica* es considerada la única especie patógena. (Ver la Fig. 1.40)

❖ Rotíferos

Son organismos multicelulares, aeróbicos y heterótrofos. Su nombre se debe a que tienen dos seres de cilios rotativos en su cabeza, lo que usan para moverse y capturar su alimento. Desempeñan una función de “limpieza” al consumir coloides orgánicos, bacterias y algas. Su presencia en el efluente de procesos de tratamiento indica una eficiente estabilización de la materia orgánica, ya que sólo pueden habitar en ambientes con bajos niveles de energía. (Ver Fig. 1.40)

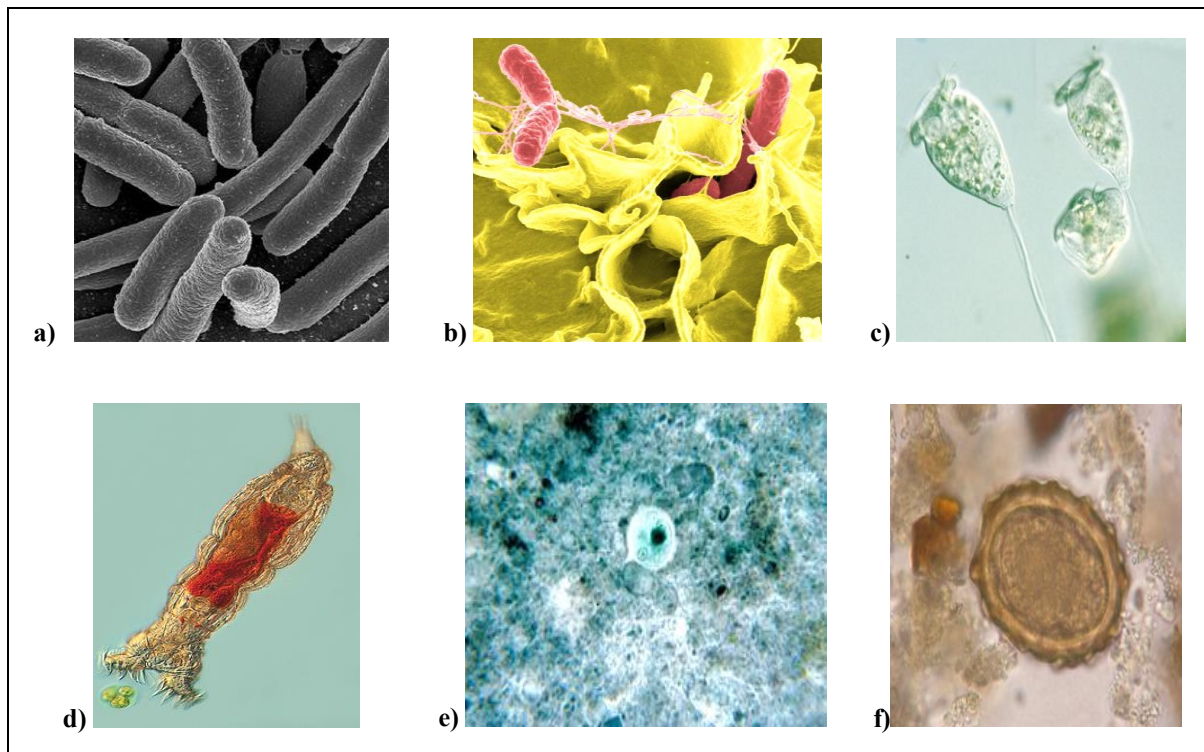


Figura 1.40 a) *Escherichia coli*. Tomado de <http://chile-hoy.blogspot.mx/2011/12/biotecnologos-de-universidad-andres.html> (Consulta 25 de agosto de 2014), b) *Salmonella typhimurium*. Tomado de <http://www.foodsafetynews.com/2013/12/fsis-releases-salmonella-action-plan/>, (Consulta 25 de agosto de 2014), c) Protozario *Vorticella*. Tomado de <http://sistemica.wikispaces.com/PROTOCTISTAS>, (Consulta 25 de agosto de 2014), d) Rotífero. Tomado de <https://www.flickr.com/photos/microagua/3276437535/>, (Consulta el 29 julio de 2014), e) *Entamoeba Histolytica*. Tomado de <https://www.studyblue.com/notes/note/n/test-2-identification/deck/267852>, (Consulta 25 de agosto de 2014), f) Huevo de Helminto, Tomado de <https://investigacion.us.es/noticias/876> (Consulta 25 de agosto de 2014).



CAPÍTULO 2 TRATAMIENTO DE LODOS

En las actividades de desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, en la operación de las plantas potabilizadoras y de plantas de tratamiento de aguas residuales se generan volúmenes de lodos, que en caso de no darles una disposición final adecuada, contribuyen de manera importante a la contaminación de la atmósfera, de las aguas nacionales y de los suelos, afectando los ecosistemas del área donde se depositen. Se ha considerado que los lodos por sus características propias o por las adquiridas después de un proceso de estabilización pueden ser susceptibles de aprovechamiento siempre y cuando cumplan con los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002 (Ver Tablas 2.1 y 2.2), o en su caso, se dispongan en forma definitiva como residuos no peligrosos; para atenuar sus efectos contaminantes para el medio ambiente y proteger a la población en general.

Tabla 2.1 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos.

Contaminante (Determinados en forma total)	Excelentes (mg/kg en base seca)	Buenos (mg/kg en base seca)
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1,200	3,000
Cobre	1,500	4,300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2,800	7,500

Tomado de la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Tabla 2.2 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella</i> spp. NMP/g en base seca	Huevos de helmintos/g en base seca
A	Menor de 1,000	Menor de 3	Menor de 1 (a)
B	Menor de 1,000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2,000,000	Menor de 300	Menor de 35

(a) Huevos de helmintos viables
NMP número más probable

Tomado de la NOM-004-SEMARNAT-2002



2.1 Definición de lodo residual

Residuo semisólido proveniente del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que no han sido sometidos a procesos de estabilización.

2.2 Tipos de lodos

2.2.1 Lodo primario

Es producido durante los procesos de tratamiento primario de las aguas residuales y se encuentra en el fondo del tanque primario de sedimentación. Este lodo contiene generalmente una gran cantidad de materia orgánica, vegetales, frutas, papel, etc.. La consistencia se caracteriza por ser un fluido denso con un porcentaje en agua que varía entre 93 % y 97 %, es de color grisáceo y oloroso, es fácilmente deshidratable con un porcentaje de sólidos totales del 4-10% y entre un 60-80% de sólidos volátiles.

2.2.2 Lodo secundario

Este tipo de lodo es de color café oscuro con un alto contenido de agua, es difícil de deshidratar y tiene un contenido de sólidos totales de 0.5-2.0%. Normalmente se caracteriza por la interacción de distintos tipos de bacterias y microorganismos, que requieren oxígeno para vivir, crecer y multiplicarse y consumen materia orgánica. Comúnmente este lodo se encuentra en forma de flóculos que contienen biomasa viva y muerta además de partes minerales y orgánicas adsorbida y almacenada. El comportamiento de sedimentación de los flóculos de los lodos activos es de gran importancia para el funcionamiento de la planta de tratamiento biológico. Los flóculos deben ser removidos, para separar la biomasa del agua limpia, y el volumen requerido de lodo activo puede ser bombeado de nuevo al tanque de aireación.

2.2.3 Lodo terciario

Es aquel que se produce a través de procesos de tratamiento posterior, por ejemplo, la adición de agentes floculantes.

2.2.4 Lodo químico

Este lodo es de café oscuro o negro, fácil de deshidratar con un porcentaje de sólidos totales del 0.5-10%, es producido del tratamiento primario con químicos.



2.2.5 Lodo digerido

Tiene lugar en los procesos de digestión aeróbica o anaeróbica y presenta una reducción de la materia orgánica por lo que se considera un lodo estabilizado. En función del tipo de digestión, puede tener un color café oscuro a negro y no genera olores desagradables.

2.3 Importancia del tratamiento de lodos.

En México, el manejo de lodos residuales municipales e industriales es un aspecto descuidado y son pocas las plantas de tratamiento de aguas residuales que cuentan con un sistema de tratamiento de lodos, además, no se tienen cifras exactas referentes a la cantidad de lodo que se genera tanto a nivel municipal como industrial.

La mayoría de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales son descargados en sistemas de alcantarillado, en cuerpos de agua o dispuestos en tiraderos a cielo abierto sin ningún tratamiento previo que permita tomar las medidas de protección adecuadas para evitar la contaminación del suelo, agua subterránea o la atracción de vectores (insectos, ratas, carroñeros, etc.), generando problemas de contaminación de los mantos freáticos y de salud pública. Por lo que, no basta solo con tratar las aguas residuales sino también se deben de tratar los lodos residuales producto de este tratamiento, los cuales deben de someterse a un análisis para determinar sus características de corrosividad, reactividad, explosividad y toxicidad (CRETI) establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005; lo que permitirá saber si el lodo es o no, un residuo peligroso y con base en esto, se pueden plantear alternativas para su manejo y/o disposición del mismo.



2.4 Tipos de tratamiento de lodos

Los procedimientos para tratar los lodos varían según la fuente y el tipo de aguas residuales de las que se derivan, así como de la disposición a la que se destinan los lodos. Los procesos que participan dentro de un sistema de tratamiento de lodos residuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.3 Procesos para el tratamiento de los lodos residuales.

Proceso	Técnica	Descripción
Físico	Espesamiento (gravedad, flotación y centrifugación), desaguado (filtración, evaporación y prensado)	Se utilizan para la reducción del volumen y peso del lodo, por medio de la remoción del agua.
Químico	Acondicionamiento, neutralización, extracción, oxido-reducción, estabilización y solidificación.	Se adicionan reactivos químicos al lodo y por medio de reacciones se realizan modificaciones en las propiedades de este.
Biológico	Digestión anaerobia y aerobia, compostaje.	Se utilizan para oxidar bioquímicamente la materia orgánica contenida en el lodo.
Térmico	Incineración, oxidación por aire húmedo, congelamiento, cristalización.	Se aplica energía para desaguar, destruir o reducir la toxicidad de los lodos.

Modificado de Van Nostrand, 1990.

Entre las alternativas tecnológicas comúnmente utilizadas para formar trenes de tratamiento de lodos, se muestran en el siguiente diagrama.



PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE LODOS GENERADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "CERRO DE LA ESTRELLA"

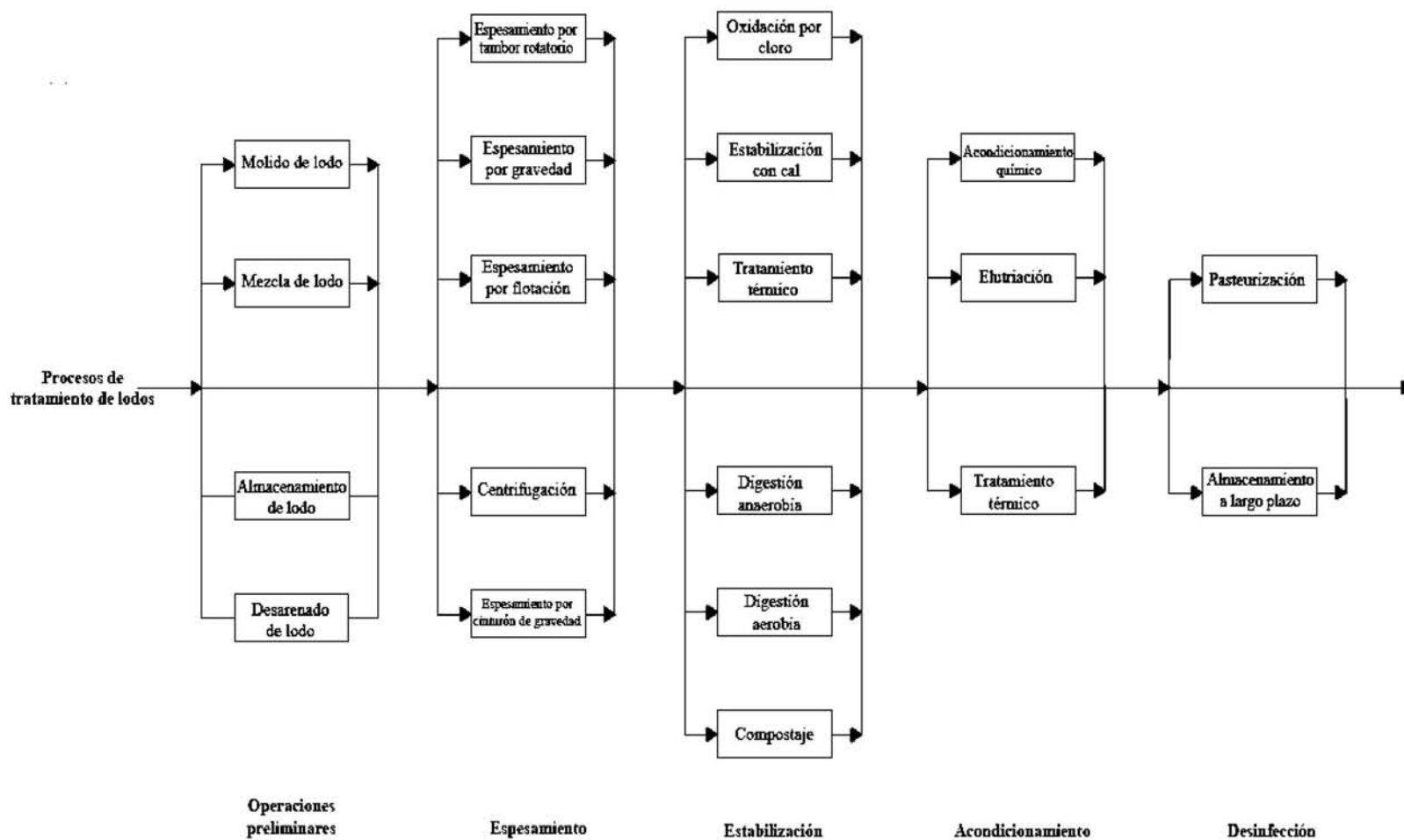
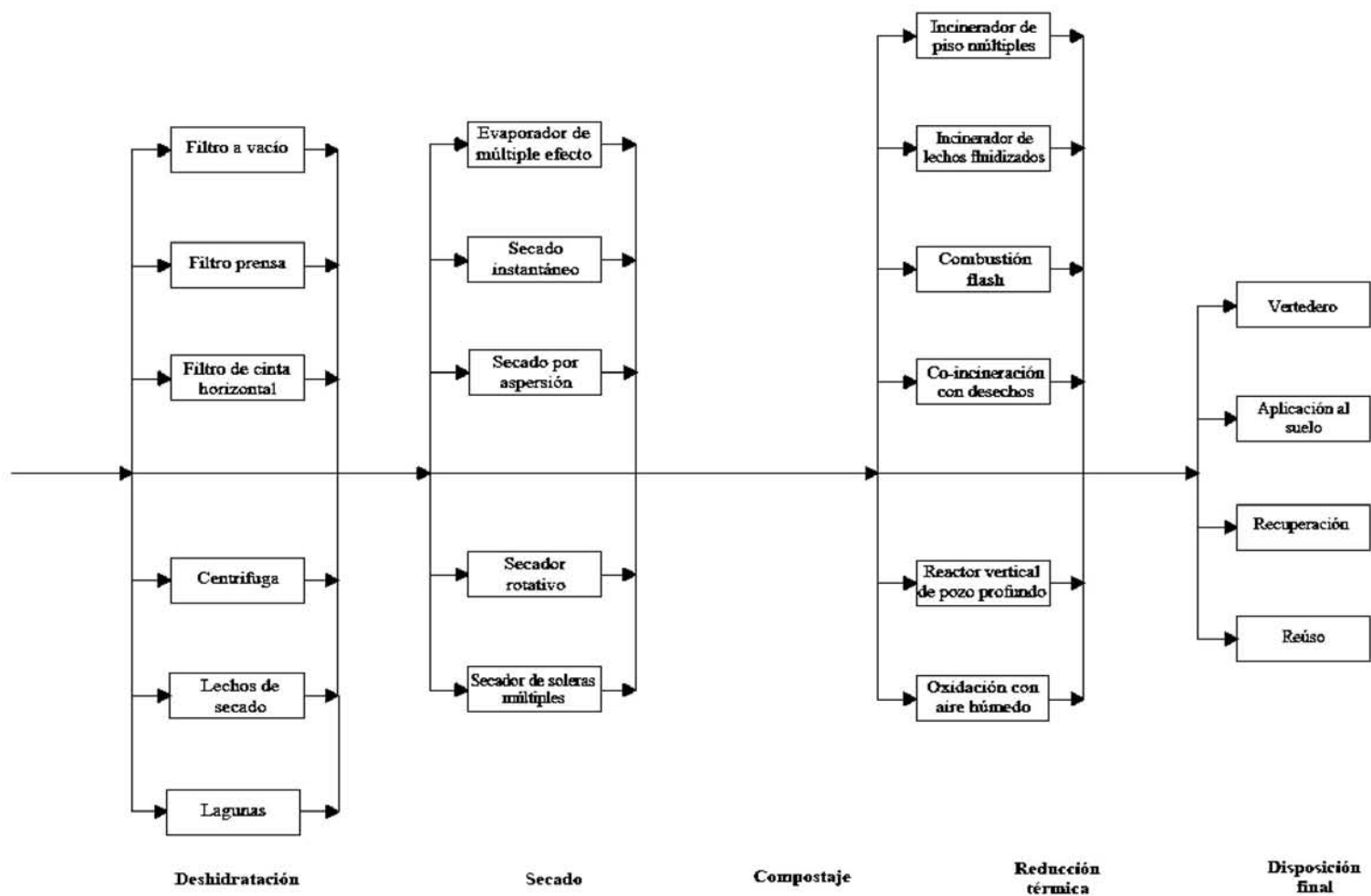


Figura 2.1 Diagrama de flujo generalizado de procesamiento y disposición de lodos. Tomado del Metcalf&Eddy, 1977.



PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE LODOS GENERADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "CERRO DE LA ESTRELLA"



Continuación.

Un proceso de tratamiento de lodos comúnmente consiste en las siguientes etapas:

- *Espesamiento.* Su función es incrementar la fracción sólida de los lodos, para reducir el costo de los tratamientos posteriores, reduciendo los volúmenes que serán procesados. Las técnicas más usadas son el espesamiento por gravedad, por flotación y centrifugado.
- *Estabilización.* Su objetivo es reducir la presencia de patógenos, eliminar los olores desagradables y reducir o eliminar su potencial de putrefacción. Las técnicas más utilizadas son la digestión aerobia, la digestión anaerobia, la estabilización con cal y el compostaje.
- *Deshidratación.* En esta etapa se disminuye el contenido de agua de los lodos disminuyendo así el volumen de estos para su transporte y manejabilidad. Las técnicas que más se utilizan para este proceso son los lechos de secado, la filtración a presión, la filtración a vacío y la centrifugación.

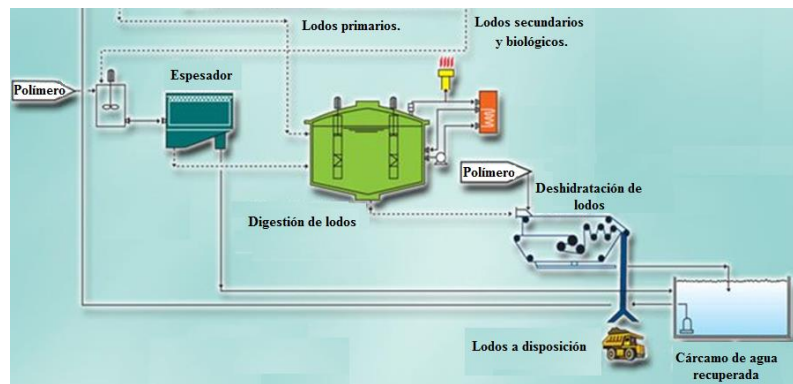


Figura 2.2 Diagrama típico del tratamiento de lodos de una PTAR municipales. Tomado de la empresa ATLATEC, 2014.

A continuación se explica con más detalle en qué consisten las diferentes tecnologías para el tratamiento de lodos residuales más usados.

2.4.1 Espesamiento

Es un procedimiento usado para incrementar el contenido de sólidos del lodo mediante la remoción de una porción de la fracción del líquido con el que se consigue una reducción de volumen de aproximadamente un 30-80%.

Para el diseño de las instalaciones de espesamiento es importante proveer una capacidad adecuada para cubrir las demandas pico y prevenir la septicidad, con sus consecuentes problemas de olores durante el proceso de espesamiento. Algunas de las ventajas del espesamiento son:

- Permite reducir la capacidad de los tanques y equipos necesarios.



- Mejora el funcionamiento del digestor y reduce las inversiones, si se recurre a la digestión posterior.
- Permite reducir la cantidad de calor requerido por los digestores, así como la cantidad de combustible necesario para el secado o incineración.
- Ayuda a conocer la cantidad de productos químicos necesarios para el acondicionamiento del lodo.
- Reduce el volumen de los lodos antes de la evacuación al terreno o al mar.
- Mejora la economía de los sistemas de deshidratación (centrífugas, filtros de vacío, filtros a presión, etc.).

Los métodos de espesamiento comúnmente utilizados son: la co-sedimentación, la sedimentación por gravedad, la flotación, la centrifugación, tambor rotatorio y de banda a gravedad.

Tabla 2.4 Métodos de espesamiento de lodos.

Método	Tipo de sólidos	Frecuencia de uso y éxito obtenido
Gravedad, co-sedimentación en el clarificador.	Lodo primario y purga de lodo activado.	<ul style="list-style-type: none"> • Ocasionalmente usado. • Puede afectar negativamente la eficiencia del clarificador primario.
Gravedad, espesamiento en tanque separado.	Lodo primario sin tratar.	<ul style="list-style-type: none"> • Comúnmente usado. • Excelentes resultados. • Puede producir olores.
	Lodo primario sin tratar y purga de lodo activado.	<ul style="list-style-type: none"> • A menudo utilizado. • En plantas pequeñas se obtienen buenos resultados. • Se obtienen lodos con una concentración de sólidos del 4-6%. • En un clima cálido puede producir olores.
Flotación por aire disuelto.	Lodo primario sin tratar y purga de lodo activado.	<ul style="list-style-type: none"> • Uso limitado. • Los resultados son similares a los obtenidos en el espesamiento por gravedad.
	Purga de lodo activado	<ul style="list-style-type: none"> • Comúnmente usado, pero su uso disminuye debido a los altos costos de operación. • Los resultados son buenos, con una concentración de sólidos del 3.5-5%.
Centrífuga de tazón sólido.	Purga de lodo activado	<ul style="list-style-type: none"> • A menudo utilizado en plantas medianas y grandes. • Los resultados son buenos, con una concentración de sólidos del 4-6%.
Espesado de banda a gravedad.	Purga de lodo activado	<ul style="list-style-type: none"> • A menudo utilizado. • Se obtienen buenos resultados, con una concentración de sólidos del 3-6%.
Espesado por tambor rotatorio	Purga de lodo activado	<ul style="list-style-type: none"> • Uso limitado. • Se obtienen buenos resultados, con una concentración de sólidos del 3-6+%.

Modificado del Metcalf&Eddy, 2003.



2.4.1.1 Espesamiento por Gravedad

En este proceso normalmente se utilizan tanques circulares. El lodo alimentado a estos tanques se sedimenta y compacta, y el lodo espesado se retira por la parte inferior del tanque. Los mecanismos de recolección de lodos convencionales consisten en rastras mecánicas con elementos verticales, usados para agitar suavemente los lodos, con la finalidad de acelerar la sedimentación. El sobrenadante que resulta se extrae y se envía al sedimentador primario o el afluente de la planta de tratamiento. El lodo espesado se bombea a los digestores o al equipo de deshidratación según se requiera.

Los espesadores por gravedad están diseñados en base a la carga de sólidos y la carga hidráulica superficial. Las cargas hidráulicas máximas recomendadas van desde 15.5 hasta 31 m³/m²*d para lodos primarios, de 4 a 8 m³/m²*d para la purga de lodos activados y de 6 a 12 m³/m²*d para la combinación de lodos primarios y purga de lodos activados. Altas cargas hidráulicas puede ocasionar un arrastre excesivo de sólidos, por el contrario, bajas cargas hidráulicas pueden producir condiciones sépticas, olores y que haya lodo flotante (Ver Tabla 2.5).

Tabla 2.5 Concentraciones típicas de lodos sin espesar y espesados, y cargas de sólidos para espesadores por gravedad.

Tipo de lodo o biosólidos	Concentración de sólidos, %		Carga de sólidos Kg/m ² *d
	Sin espesar	Espesado	
Por separado			
Lodo primario.	2-6	5-10	100-150
Lodo humus de filtros rociadores.	1- 4	3-6	35-50
Lodo de lecho bacteriano.	1-3.5	2-5	40-50
Lodo activado.	0.5-1.5	2-3	20-40
Lodo de aireación extendida.	0.2-1	2-3	5-8
Lodo activado con oxígeno puro.	0.5-1.5	2-3	20-40
Lodo primario digerido anaeróbicamente.	8	12	120
Combinado			
Lodo primario y lodo humus de filtros roc.	2-6	5-9	60-100
Lodo primario y purga de lodo activado.	0.5-1.5	4-6	25-70
	2.5-4	4-7	40-80
Purga de lodo activado y lodo de lecho bacteriano.	2-6	5-8	20-90
Purga de lodo activado y lodo humus de filtros roc.	0.5-2.5	2-4	20-40
Químico (terciario)			
Cal alta.	3-4.5	12-15	120-300
Cal baja.	3-4.5	10-12	50-150
Hierro.	0.5-1.5	3-4	10-50

Tomado de Metcalf&Eddy, 2003.

A veces, los espesadores por gravedad pueden disponer de placas paralelas que, al aumentar la superficie de decantación, permiten reducir el volumen del espesador, obteniendo buenos resultados en el espesamiento.

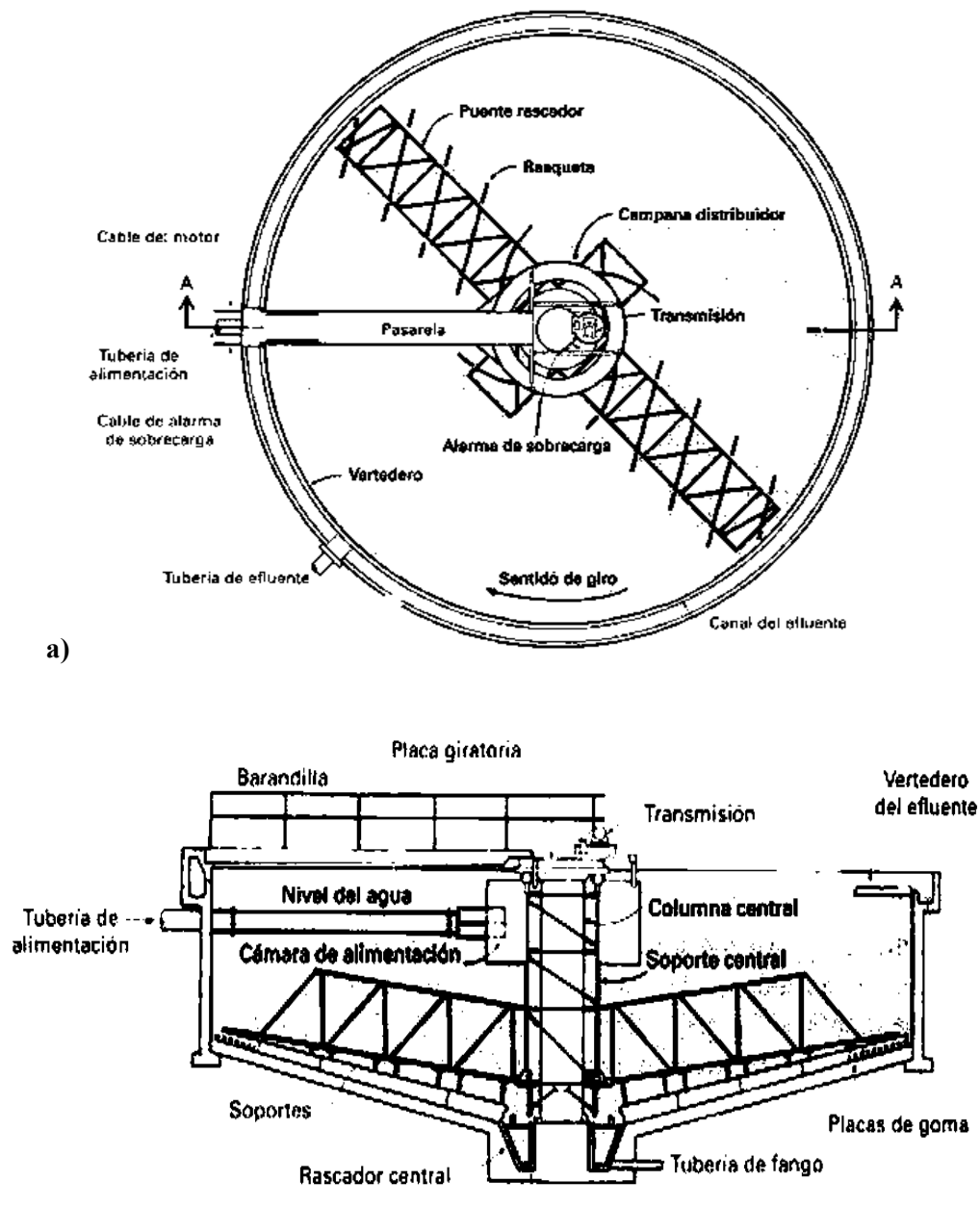


Figura 2.3 Esquema de un espesador por gravedad: a) Plano, b) Seccionado. Tomado de Metcalf&Eddy, 2003.



En la siguiente tabla se presenta las principales ventajas y desventajas de los espesadores por gravedad.

Tabla 2.6 Ventajas y desventajas de los espesadores por gravedad.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> Alcanza una concentración de sólidos del 4-6%. Puede tratar un volumen mayor de lodos. Facilidad de operación. Bajo costo de operación y mantenimiento. Bajo costo de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> Requiere de una superficie considerable de terreno. Contribuye a la producción de olores.

Elaboración propia a partir de las referencias 5, 14, 26, 35, 51,53.

2.4.1.2 Espesamiento por Flotación

En este proceso, el aire es introducido en una solución con presión elevada. Cuando la solución es despresurizada el aire disuelto es liberado como burbujas finas que empujan al lodo hacia la superficie donde es removido. En lugares donde el frío es un problema o donde se requiere controlar los olores, el espesamiento por flotación esta normalmente dentro de una construcción.

El espesamiento por flotación es usado más eficientemente para lodos de deshecho o purga de procesos de tratamiento biológico, tales como lodos activados, nitrificación, humus de filtros rociadores, lodos de digestión aerobia, aunque también se ha utilizado para lodos primarios y lodos químicos. La concentración de sólidos flotantes para purgas de lodos activados es influida por la proporción de aire-sólidos, las características del lodo, la carga de sólidos y la aplicación de polímeros. Los espesadores por flotación normalmente están diseñados para cargas de sólidos que se muestran en la Tabla 2.7. Las altas cargas de sólidos generalmente resultan en una baja concentración de lodo espesado y las dificultades operacionales pueden surgir cuando la carga de sólidos excede aproximadamente los 10 kg/m²*h.

Tabla 2.7 Carga de sólidos típicos para las unidades de flotación por aire disuelto.

Tipo de lodo o biosólido	Carga de sólidos, kg/m ² *h	
	Sin químicos	Con químicos
Lodo activado. Licor mezclado Sedimentado	1.2 – 3 2.4 – 4	Arriba de 10
Lodo activado con oxígeno puro.	3 – 4	Arriba de 10
Lodo humus de filtros rociadores.	3 – 4	Arriba de 10
Primario + Lodo activado	3 – 6	Arriba de 10
Primario + Lodo humus de filtros rociadores.	4 – 6	Arriba de 10
Lodo primario	4 – 6	Arriba de 12.5

Tomado de Metcalf&Eddy, 2003.

El proceso inicia cuando el influente crudo (1) se introduce al espesador por flotación, cerca del 20-100% del efluente clarificado se recicla (3) con las bombas de reciclado. La disolución de aire ocurre dentro de la bomba de reciclado de fase múltiple especialmente diseñada (2) o a través de un sistema convencional de disolución de aire incluyendo un compresor de aire, bomba de reciclado y tanque de disolución de aire. La mezcla de aire/agua reciclada se inyecta luego a la línea del influente crudo que entra en el espesador por flotación, permitiendo que las burbujas microscópicas se adhieran a los sólidos suspendidos. Los sólidos flotantes se acumulan en la superficie del espesador por flotación. Un desnatador superficial no metálico (4) con varias rastras de recolección, junta los sólidos flotantes y los empuja hacia la canaleta de recolección de flotantes (5) ubicada en el extremo adyacente a la entrada del espesador por flotación. El agua clarificada sale del tanque por el extremo opuesto a la entrada. Los sólidos más pesados que sedimentan en el fondo del tanque se recolectan y retiran a través de un sistema de cadena y rastras o un tornillo transportador (6).

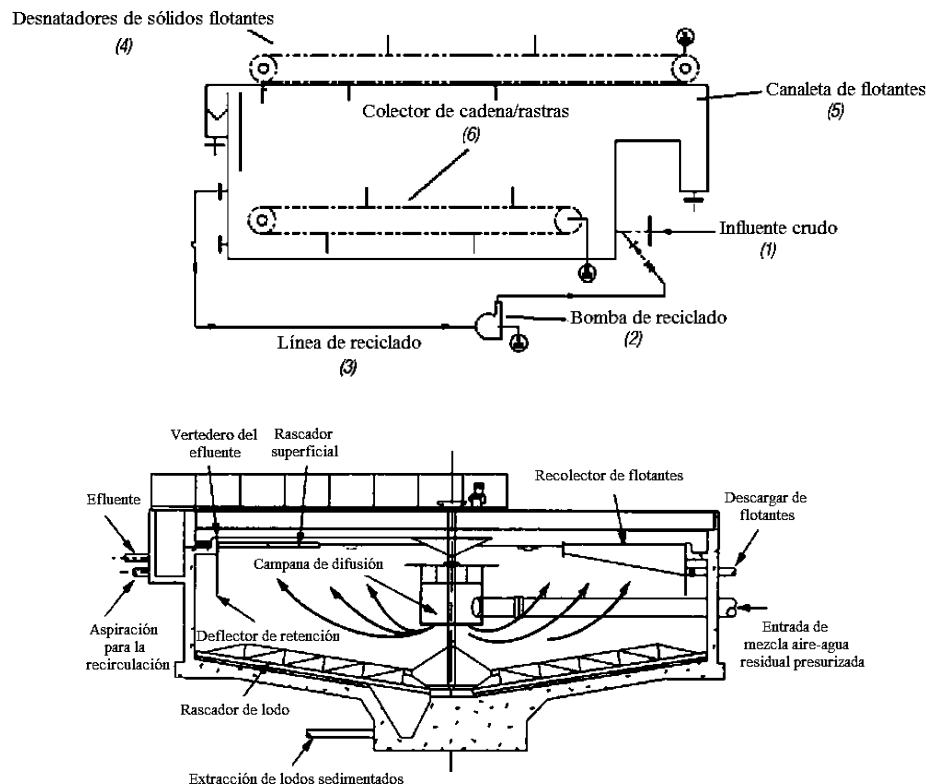


Figura 2.4 Espesador por flotación de aire disuelto. Modificado de Metcalf&Eddy, 1977.

La concentración del lodo en materia seca tras esta fase de espesamiento suele estar en el entorno del 4% (40 g/l). El espesamiento del lodo, fundamentalmente en la flotación, se ve favorecido mediante el empleo del polielectrolito adecuado (pudiendo alcanzarse hasta el 6%).

Tabla 2.8 Ventajas y desventajas de los espesadores por flotación.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Mayor volumen de tratamiento que los espesadores de gravedad. • Se obtiene mayor concentración de lodos que en los espesadores de gravedad. • Requiere menor área de instalación. • Remueve microorganismos y precipitados difíciles de sedimentar y filtrar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor costo de operación y mantenimiento. • Precisa un tanque intermedio previo al bombeo a los equipos de deshidratación. • Es más sensible a variaciones de temperatura, recargas hidráulicas y características químicas (fase solución, pH, entre otros).

Elaboración propia a partir de las referencias 5, 14, 26, 35, 51, 53.

2.4.1.3 Espesamiento por Centrifugación

Este proceso se utiliza tanto para espesar lo lodos como para deshidratarlos. La aplicación de centrífugas para el espesamiento está normalmente limitada a los lodos activados. Este proceso involucra la sedimentación de las partículas en el lodo bajo la influencia de las fuerzas centrífugas. Los dos tipos principales de centrífugas que se utilizan comúnmente son el de tazón sólido y el de canasta perforada.

La *centrífuga de tazón sólido* funciona con una alimentación y descarga continua. La máquina tiene un tazón de pared sólida sin perforaciones, generalmente con un eje de rotación horizontal. El lodo se introduce continuamente a la unidad. Un tornillo helicoidal, que gira a una velocidad ligeramente diferente, mueve el lodo acumulado hacia el extremo que se encuentra sellado, donde se concentran más los sólidos.

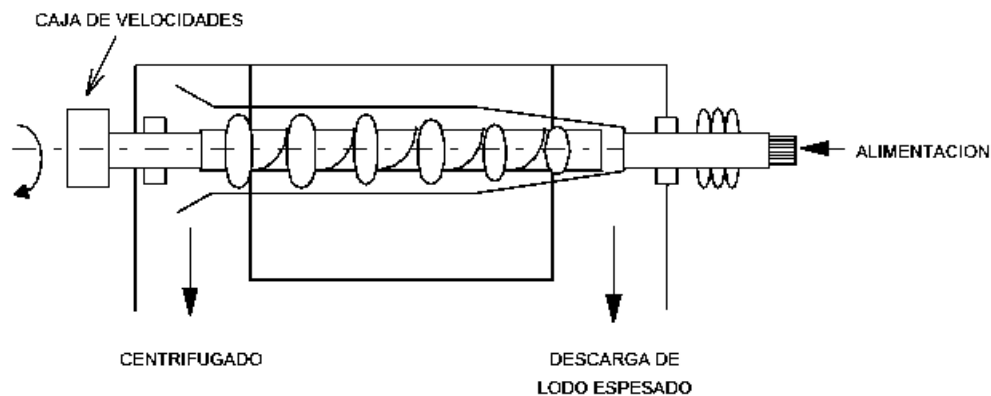


Figura 2.5 Centrífuga de Tazón Sólido. Tomado de CONAGUA, 2007.

En este tipo de equipos se han reportado concentraciones de torta de sólidos del orden de 30% a 35%, aunque se pueden lograr concentraciones de torta del 35% al 40%; sin embargo, se requiere de una dosis alta de polímero. Las concentraciones más altas han sido reportadas para mezclas de lodos primarios. Algunas de las ventajas y desventajas que presenta este equipo son:

Tabla 2.9 Ventajas y desventajas de la centrífuga de tazón sólido.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Produce menos olores. • No requiere de personal especializado para operar el equipo. • Alto nivel promedio de sólidos en la torta. • Menor costo de mantenimiento. • Alta seguridad. • Capacidad de manejar grandes cantidades de lodo en un pequeño espacio. • Producción de efluente clarificado sin químicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede utilizarse solamente para partículas menores de 400 micras. • Requiere de pre-tratamiento y desarenado, ya que la arena puede desgastar el tazón rápidamente.

Elaboración propia a partir de las referencias 5, 11, 14, 27, 35.

La *centrífuga de canasta perforada* también llamada centrífuga filtro o clarificador. Tienen una pared perforada y un rotor tubular cilíndrico. En la mayoría de los casos la pared externa consiste en una fina malla metálica o una serie de mallas soportadas por una pesada malla gruesa, la cual a su vez es soportada por un plato. El líquido pasa a través de la malla, y las partículas muy largas se depositan en esta. En la Tabla 2.10 se muestran algunas de las ventajas y desventajas que tiene este equipo.

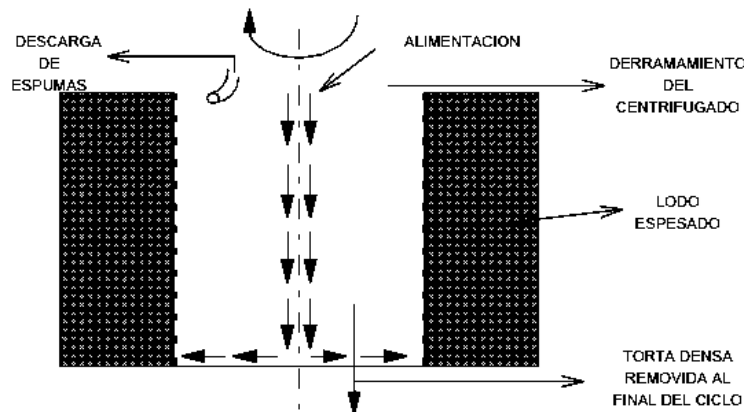


Figura 2.6 Centrífuga de Canasta Perforada. Tomado de CONAGUA, 2007.

Tabla 2.10 Ventajas y desventajas de la centrífuga de canasta perforada.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Puede emplearse para espesamiento o deshidratación. • Flexibilidad para conseguir condiciones del proceso. • Menor costo de operación y mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Operación intermitente. • Requiere de una estructura especial. • Mayor relación costo de inversión / capacidad.

Elaboración propia a partir de las referencias 5, 11, 14, 27, 35.



2.4.2 Estabilización

Este proceso consiste básicamente en la destrucción de células. La selección de un cierto método radica principalmente en el procedimiento de disposición final planeado. Si lo que se quiere hacer es desaguar o incinerar el lodo, frecuentemente no se emplea este procedimiento.

La estabilización del lodo se lleva a cabo principalmente para:

- Reducir el contenido de microorganismos patógenos.
- Eliminar los olores desagradables.
- Reducir o eliminar su potencial de putrefacción.

Los medios de estabilización más eficaces para eliminar el desarrollo de estas condiciones son:

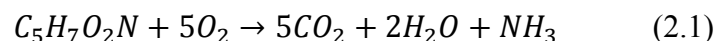
- La reducción biológica del contenido de materia volátil.
- La oxidación química de la materia volátil.
- La adición de agentes químicos para hacer el lodo inadecuado para la supervivencia de microorganismos.
- La aplicación de calor para desinfectar o esterilizar el lodo.

A la hora de diseñar un proceso de estabilización de lodos, es importante considerar la cantidad de lodos a tratar, la integración del proceso de estabilización con las otras unidades de tratamiento, y los objetivos del proceso de estabilización. Las técnicas más utilizadas para la estabilización de lodos son la digestión anaerobia, la digestión aerobia, la estabilización con cal y el compostaje, las cuales se explicaran a continuación.

2.4.2.1 Digestión Aerobia

Es un proceso en el cual se produce aireación, por un periodo de tiempo, de una mezcla de lodo digerible de la clarificación primaria y del lodo de tratamiento biológico aerobio, con el resultado de una destrucción de células y una disminución de sólidos suspendidos volátiles (SSV).

Este proceso está basado en la respiración endógena, que ocurre cuando existe poco alimento, por lo que los microorganismos comienzan a consumir su propio protoplasma para obtener energía. El mecanismo de respiración endógena está representado por la siguiente ecuación.

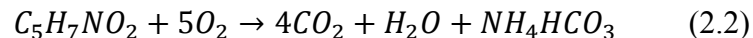


Durante el proceso de digestión, el tejido de la célula es oxidado a dióxido de carbono, agua y nitratos. Actualmente, solo entre el 75 y 80% del total de las células es oxidado; el restante 20 y 25% está integrado por componentes inertes y compuestos orgánicos no biodegradables. En la operación real, la digestión aerobia involucra la oxidación directa de cualquier materia

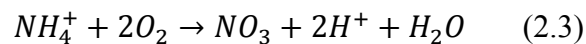


biodegradable y la oxidación del material celular microbiano por los microorganismos. Los cambios bioquímicos que ocurren en un digestor aerobio pueden ser descritos por las siguientes ecuaciones:

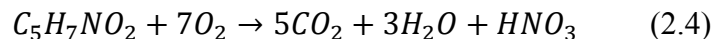
Destrucción de la biomasa:



Nitrificación del nitrógeno amoniacal:



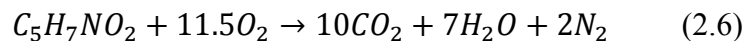
Ecuación general con nitrificación completa:



Usando nitrógeno nítrico como aceptor de electrones (Desnitrificación):



Con nitrificación/desnitrificación completa:



Según lo dado por la Ec. 2.2 a la 2.4, la conversión de nitrógeno orgánico a nitrato resuelta de un incremento en la concentración de los iones de hidrógeno y posteriormente, en la disminución del pH.

En el caso de digestión aerobia, los tiempos de residencia son menores que en los procesos anaerobios, lo que significa menores inversiones en capacidad o volumen del digestor. Sin embargo, los costos de la energía para aireación puede ser un factor importante en grandes plantas. Estos pueden ser operados como reactores de flujo continuo o batch.

Como se mencionó anteriormente, la digestión aerobia se produce aireando los lodos orgánicos en un tanque abierto parecido a un tanque de aireación de lodos activados. El digestor aerobio debe preceder a un tanque de sedimentación, a menos que se decida disponer el lodo en forma líquida en el suelo. A diferencia del proceso de lodos activados, el sobrenadante del sedimentador se recicla conduciéndolo hacia el extremo inicial de la planta. Esto se debe a que el sobrenadante tiene una gran cantidad de sólidos suspendidos (100 a 300 mg/l), DBO₅ (hasta 500 mg/l), NTK (hasta 200 mg/l) y fósforo total (hasta 100 mg/l).

Debido a que la fracción de materia volátil es pequeña, la gravedad específica de los sólidos de los lodos digeridos será más grande de lo que fue antes de la digestión. Así, los sólidos se

sedimentan formando una masa más compacta y la concentración del flujo inferior del sedimentador puede alcanzar el 3%.

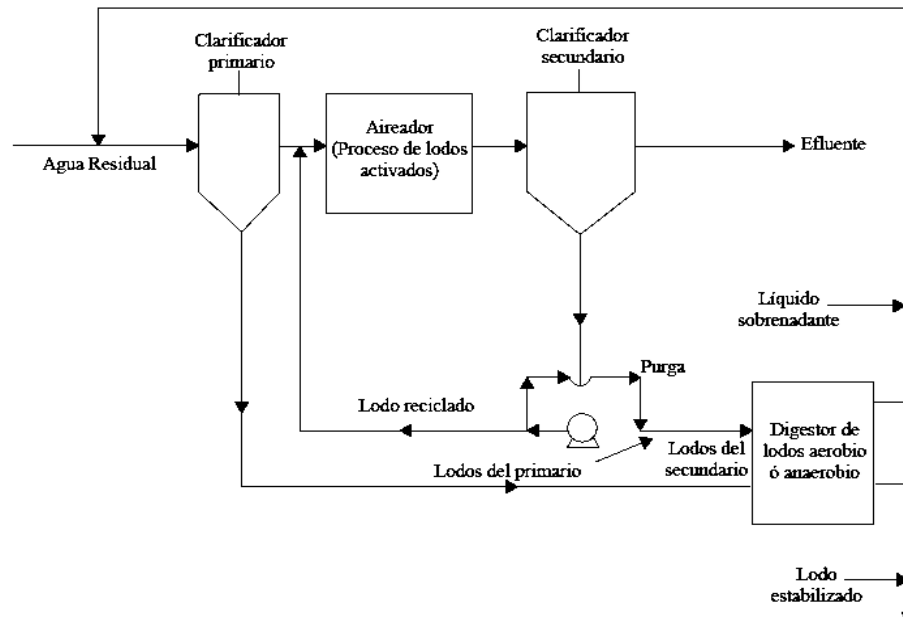


Figura 2.7 Diagrama de proceso de la digestión aerobia de los lodos. Tomado de Ramalho, 1991

Las ventajas y desventajas que tiene la digestión aerobia en comparación a la digestión anaerobia son:

Tabla 2.11 Ventajas y desventajas de la digestión aerobia.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • La reducción de sólidos volátiles es semejante a la alcanzada por la digestión anaerobia. • Menor costo de inversión, para plantas con gastos inferiores a 220 l/s. • No genera malos olores. • Produce un sobrenadante bajo en DBO₅, sólidos suspendidos y nitrógeno amoniacal. • Produce un lodo biológicamente estable. • Produce un lodo con excelentes características de deshidratación. • Reduce la cantidad de grasas. • Reduce el número de patógenos a un nivel inferior. • No requiere personal calificado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene altos costos de energía para el suministro de oxígeno, aún para plantas muy pequeñas. • Se ve afectado por la temperatura, la localización, la geometría del tanque, la concentración de sólidos en la alimentación, el tipo de dispositivo para la aireación y el tipo de material del tanque.

Elaboración propia a partir de las referencias 5, 11, 14, 27, 35.

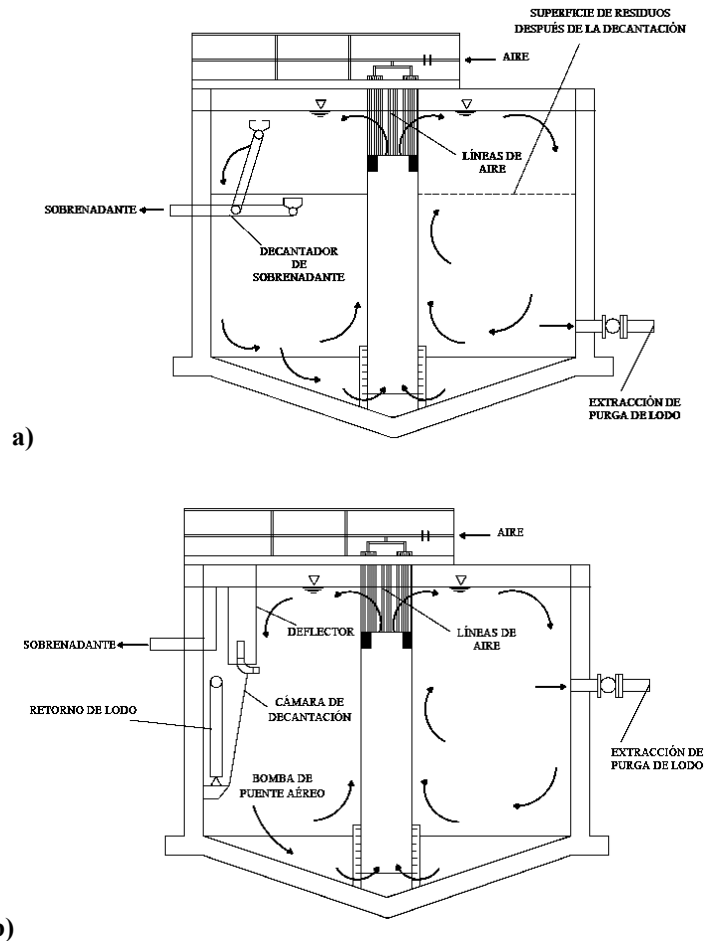


Figura 2.8 Ejemplos de digestores aerobios; a) Operación tipo batch con adición de aire, b) Operación continua con adición de aire. Tomado de Metcalf&Eddy, 2003.

Existen tres variantes del proceso de digestión de lodos por vía aerobia: 1) convencional, 2) oxígeno puro y 3) digestión aerobia termófila autotérmica (ATAD).

1) Digestión aerobia convencional

Este proceso utiliza tanques abiertos a la atmósfera, en los cuales se aplica aire a los lodos espesados; la forma de suministrar el aire puede ser a través de medios mecánicos (propelas o turbinas) o mediante difusores. Debido a que la mayoría de los digestores de este tipo son tanques abiertos, la temperatura dependerá de las condiciones del clima, por lo que, a bajas temperaturas el proceso se retarda mientras que a altas temperaturas este se acelera.

Los factores que se deben considerar en el diseño son: la temperatura, la disminución de sólidos, el volumen del tanque, la concentración de sólidos en la alimentación, los requerimientos de



oxígeno, la necesidad de energía para mezclar y la operación del proceso. Los criterios típicos para el diseño de los digestores aerobios se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 2.12 Criterios de diseño para digestores aerobios.

Parámetro	Unidades, SI	
	Unidades	Valor
SRT	d	
A 20°C		40
A 15°C		60
Carga de sólidos volátiles.	Kg/m ³ *d	1.6-4.8
Requerimientos de oxígeno:		
Tejido celular	Kg O ₂ /Kg SSV	-2.3
DBO ₅ del lodo primario	Destruído	1.6-1.9
Requerimiento de energía para mezclar.		
Aireadores mecánicos	kW/10 ³ m ³	20-40
Difusión de aire	m ³ /m ³ *min	0.02-0.04
Oxígeno disuelto en residuo líquido.	mg/L	1-2
Reducción de los sólidos suspendidos volátiles.	%	38-50

Tomado de Metcalf&Eddy, 2003.

2) Digestión aerobia por oxígeno puro

En este proceso se tienen dos modalidades: tanques abiertos a la atmósfera y tanques cerrados. En el caso de los tanques abiertos a la atmósfera, el oxígeno disuelto se inyecta a través de difusores especiales que producen microburbujas y estas no llegan a la interfase agua-atmósfera, sino que se disuelven antes de llegar a ese límite. Con respecto a los tanques cerrados, se mantiene una atmósfera de oxígeno puro y el oxígeno se transfiere a través de aireadores mecánicos.

Los biosólidos resultantes de este proceso son similares a los obtenidos en la digestión aerobia convencional. Este proceso es particularmente aplicable a climas fríos, debido a su relativa falta de sensibilidad a los cambios de temperatura del aire.

La ventaja de usar tanques cerrados es que el sistema no se ve afectado por la temperatura exterior y, dada la naturaleza exotérmica de la digestión de sólidos, la temperatura del proceso se incrementa. La mayor desventaja que presenta este sistema es el alto costo por la generación del oxígeno, por ello, solo se recomienda aplicar en plantas de lodos activados que funcionen con la modalidad de oxígeno puro.

3) Digestión aerobia termófila autotérmica (ATAD)

Este proceso utiliza la energía liberada por la oxidación de la materia orgánica, incrementando la temperatura para disminuir el tiempo de degradación de los sólidos suspendidos. Este utiliza tanques cubiertos y aislados para conservar el calor generado por la oxidación de los sólidos volátiles durante la digestión. Se alcanzan temperaturas de operación entre 55 y 70°C, sin necesidad de contar con una fuente externa de calor, ya que este puede obtenerse del calor liberado por el proceso exotérmico de oxidación microbiana. Aproximadamente se producen 20,000 kJ de calor por cada kg de sólidos volátiles destruidos por ello, el proceso se define como autotérmico. El suministro de oxígeno puede ser con inyección de aire por difusores o por oxígeno puro, asimismo, el sistema debe contar con aireadores o agitadores mecánicos.

Dentro del reactor ATAD, los niveles suficientes de oxígeno, los sólidos volátiles, y el mezclando permiten a los microorganismos aerobios degradar la materia orgánica a dióxido de carbono, agua y nitrógeno por productos.

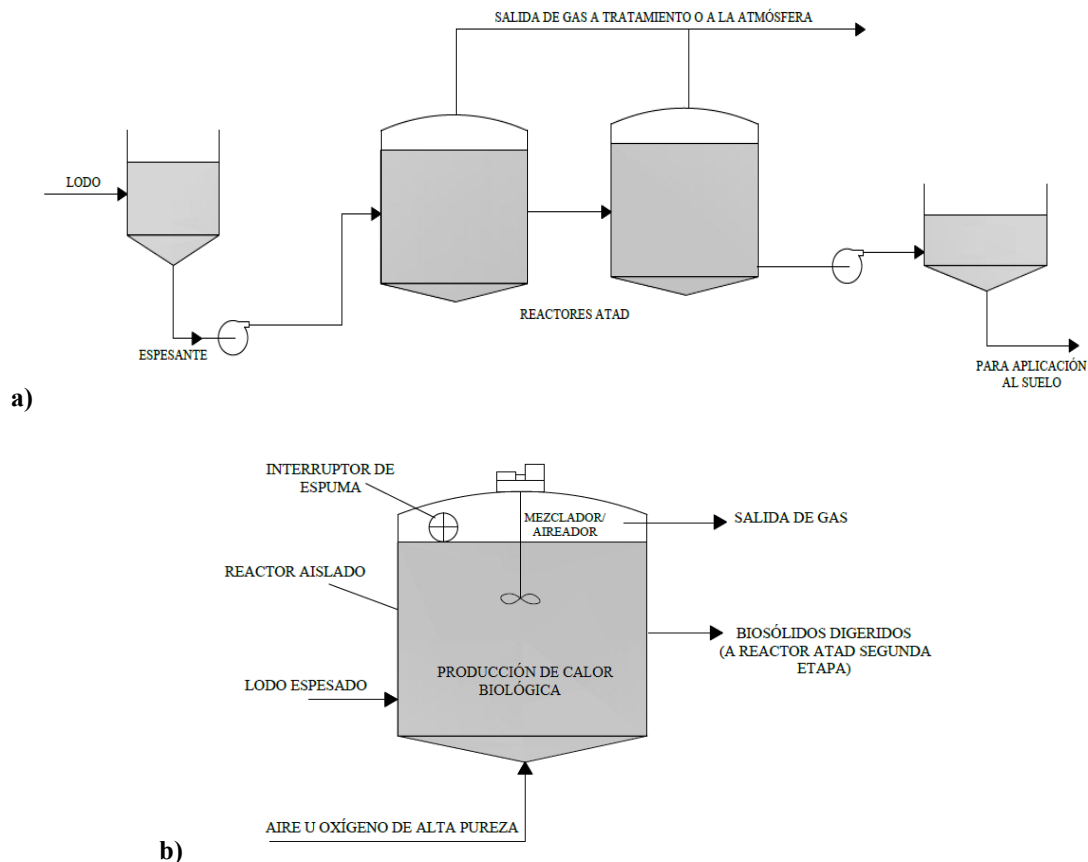
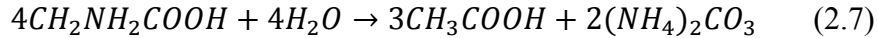


Figura 2.9 Sistema de digestión aerobia termófila autotérmica (ATAD); a) Sistema esquemático, y b) Esquema del reactor. Tomado de Metcalf&Eddy, 2003.

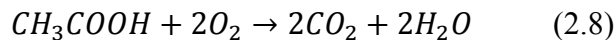


La mayoría de los sistemas ATAD pueden operar bajo condiciones microaeróbicas donde la demanda de oxígeno excede el suministro de oxígeno. Debido a ello, el material celular proteinácea se somete a fermentación donde la proteína se representa como peptona en la Ec. (2.7).



Tanto la Ec. (2.2) y (2.7) resultan de la producción de amoníaco que reacciona con el agua y el dióxido de carbono para formar bicarbonato de amonio y carbonato de amonio para aumentar la alcalinidad. Como la nitrificación no se produce, el pH en el sistema ATAD será de entre 8 a 9, más alto que en digestores aerobios convencionales.

La mayor parte del nitrógeno amoniacal será recirculado al proceso de líquido en las corrientes laterales de las instalaciones de control de olor y de deshidratación. El ácido acético (o acetato) producido por la fermentación de proteínas es uno de los ácidos grasos volátiles. El ácido acético se oxida posteriormente en presencia de suficiente oxígeno disuelto como se describe en la Ec. (2.8).



Las principales ventajas y desventajas del proceso ATAD son:

Tabla 2.13 Ventajas y desventajas del sistema de digestión aerobia termófila autotérmica (ATAD).

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Los tiempos de retención son menores que la digestión aerobia convencional y que la digestión anaerobia. • Su operación es simple. • Reduce los microorganismos patógenos a niveles por debajo del límite de detección. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene el potencial para producir malos olores. • El lodo es difícil de deshidratar. • No se alcanza el nivel de nitrificación de los lodos.

Elaboración propia a partir de las referencias 5, 11, 14, 27, 35.

Los factores que se deben considerar en el diseño de un sistema ATAD son: el pre-espesamiento, la cantidad y tipos de reactores, el post-espesamiento, las características de la alimentación, la aireación, el mezclado, la temperatura, el pH, el control de espuma y los olores.



Tabla 2.14 Criterios de diseño para la digestión aerobia termófila autotérmica (ATAD).

Parámetro	Unidades, SI		
	Unidades	Alcance	Típico
Reactor:			
TRH	d	4-30	6-8
Carga volumétrica g/l			
SST, 40 a 70.	kg/m ³ *d	5-8.3	
SSV, 25 g/l min	kg/m ³ *d	3.2-4.2	
Temperatura:			
Etapa 1	°C	35-50	40
Etapa 2		50-70	55
Aireación y mezclado:			
Tipo de mezclado			Aspirar
Eficiencia de la transferencia de energía.	kg O ₂ /kWh		2
Requisitos de energía	W/m ³	130-170	

Adaptado de Metcalf&Eddy, 2003.

2.4.2.2 Digestión Anaeróbica

Consiste en la degradación biológica de sustancias orgánicas complejas, en ausencia de oxígeno libre. En este proceso, la mezcla de la materia orgánica de lodos primarios sedimentados y biológicos es convertida biológicamente, bajo condiciones anaerobias, en varios productos finales, incluyendo metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂). Este proceso se lleva a cabo en un reactor completamente cerrado. Los lodos se introducen en el reactor de forma continua o intermitente, y permanecen dentro de estos tanques durante periodos de tiempo considerables. El lodo estabilizado que se extrae del proceso tiene un bajo contenido de materia orgánica y de microorganismos patógenos vivos.

Tabla 2.15 Composición del biogás generado en los digestores anaerobios.

Gas	%Volumen
Metano (CH ₄)	55 – 75
Dióxido de Carbono (CO ₂)	25 – 45
Nitrógeno (N ₂)	2 – 6
Hidrógeno (H ₂)	0.1 – 2
Ácido Sulhídrico (H ₂ S)	1 – 1.5

Adaptado de MOP 8 WEF, 1992.

La transformación biológica de la materia orgánica en el tratamiento de lodos sucede en tres fases.

- *Hidrólisis*, involucra la transformación de las enzimas de compuestos de alto peso molecular en compuestos adecuados para ser usados como fuentes de energía.

- *Acidogénesis*, involucra la transformación bacteriana de los compuestos resultado de la hidrólisis en compuestos intermedios de menos peso molecular.
- *Metanogénesis*, en esta etapa final, se forma el metano (CH_4) y el dióxido de carbono (CO_2), gracias a las bacterias metanogénicas.

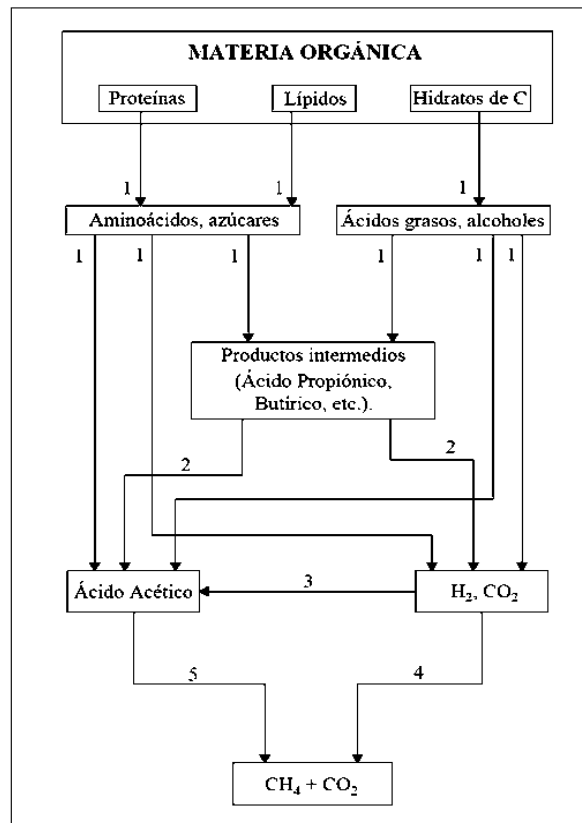


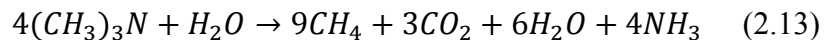
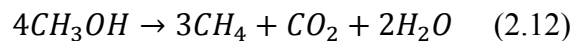
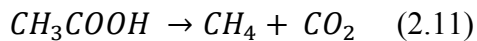
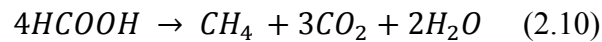
Figura 2.10 Diagrama esquemático de las etapas de la digestión anaerobia, 1) Bacterias hidrolíticas-acidogénicas, 2) Bacterias acetogénicas (productoras de hidrógeno), 3) Bacterias homoacetogénicas (consumidoras de hidrógeno), 4) Bacterias metanogénicas hidrogenófilas, 5) Bacterias metanogénicas acetoclásticas. Modificado de la Ref. 38.

En un digestor, un conjunto de microorganismos anaerobios trabajan juntos para llevar a cabo la transformación de los lodos y residuos orgánicos. Un grupo de microorganismos es responsable de hidrolizar polímeros orgánicos y lípidos para construir bloques estructurales básicos como monosacáridos, aminoácidos y compuestos relacionados. Un segundo grupo de bacterias anaerobias fermenta los productos de degradación de ácidos orgánicos simples (el más común es el ácido acético). Un tercer grupo de microorganismos convierte el hidrógeno y el ácido acético formado por los formadores de ácido a gas metano y dióxido de carbono. Las bacterias responsables de esta transformación son estrictamente anaerobias y son llamada metanogénicas.

Es importante tener en cuenta que las bacterias de metano sólo pueden utilizar un número limitado de sustratos para la formación de metano. Actualmente, se sabe que los metanógenos



utilizan los siguientes sustratos: CO_2+H_2 , formiatos, acetatos, metanol, metilaminas y monóxido de carbono. Las reacciones típicas que se llevan a cabo en este proceso son:



En un digestor anaerobio, las dos principales vías involucradas en la formación de metano son:

- 1) Metanogénesis hidrogenófila, a partir de la conversión de hidrógeno y dióxido de carbono a metano y agua (Ec. 2.9).
- 2) Metanogénesis acetoclástica, a partir de la degradación del ácido acético a metano y dióxido de carbono (Ec. 2.11).

Para mantener un sistema de tratamiento anaerobio que establezca los residuos orgánicos eficientemente, se deben de controlar los siguientes parámetros.

- Las bacterias metanogénicas y no metanogénicas deben estar en un estado de equilibrio dinámico.
- El contenido del reactor debe estar libre de oxígeno disuelto y de concentraciones de metales pesados y sulfuros.
- El pH del entorno acuoso debe oscilar entre 6.6-7.6, debe de asegurarse que el pH no esté por debajo de 6.2, ya que, las bacterias de metano no pueden trabajar bajo esta condición.
- Los rangos de temperatura óptimos son la mesófila, de 30 a 38°C y la termófila, de 49 a 57°C.

Los porcentajes típicos de remoción de contaminantes que se obtiene con la digestión anaerobia son:

- Sólidos totales del 33-58%.
- Sólidos volátiles del 35-50%.
- Microorganismos patógenos del 85% a menos del 100%.

Actualmente se emplean tres tipos de procesos de digestión anaerobia de: baja tasa, alta tasa y dos etapas.

1) Digestión anaerobia de baja tasa o convencional

Es un proceso de conversión de biomasa en biogás mediante la degradación biológica de la materia orgánica en reactores sin mezcla, en ausencia de oxígeno, con períodos de digestión más largos que los digestores de alta tasa, entre 30 y 60 días, y sin calefacción. Debido a que la digestión anaerobia es un proceso lento, se recomienda aplicar calor para acelerar las reacciones bioquímicas implicadas. La mayoría de los digestores anaerobios convencionales funcionan en la gama mesofílica, entre 30-38°C.

El proceso inicia cuando el lodo crudo es alimentado al tanque en forma intermitente. Donde poco después de haber alimentado al digestor con lodo se generan burbujas de gas, y la acción de subir de estas a la superficie es el único mezclado. Como resultado, el contenido del tanque se estratifica, formando tres zonas distintas: una capa flotante de natas, un nivel intermedio de sobrenadante y una capa inferior de lodo. Básicamente, toda la descomposición está restringida a la zona inferior. El lodo estabilizado, que se acumula y espesa en el fondo del tanque, es extraído periódicamente desde el centro del piso. El sobrenadante es removido del costado del tanque y recirculado hacia el principio de la planta de tratamiento.

El gas se acumula arriba de la superficie líquida y es extraído a través de la cubierta. El biogás que se produce en estos digestores se utiliza, al igual que el producido por los digestores de alta tasa, para el funcionamiento de motores de combustión, turbinas de gas, hornos, calderas, estufas y celdas de hidrógeno.

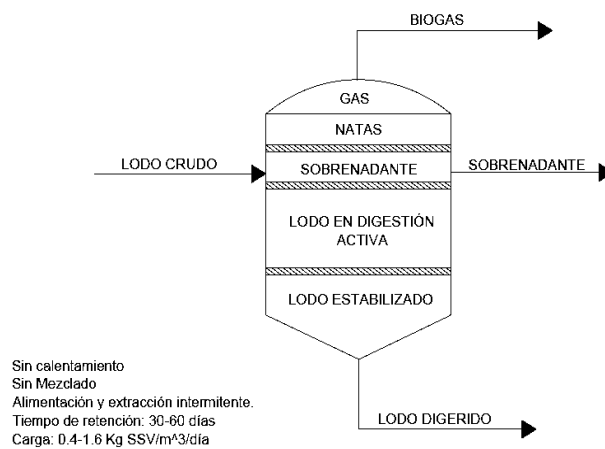


Figura 2.11 Sistema de digestión anaerobia de baja tasa o convencional. Modificado de Metcalf&Eddy, 2003.

Las principales ventajas y desventajas que tiene este proceso para la estabilización de los lodos son:

Tabla 2.16 Ventajas y desventajas de la digestión anaerobia de baja tasa o convencional.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Se obtiene metano como subproducto. • Tiene tiempos de residencia de 30 a 60 días. • Reduce la masa total del lodo. • La temperatura se mantiene entre 30-38°C (Mesofílica). • Produce menos olores. • Ahorro en costos de energía. • Elimina algunos microorganismos patógenos. • Los biosólidos pueden usarse como acondicionador de suelos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene un alto costo de inversión inicial. • Produce sobrenadantes que pueden ser difíciles de tratar cuando se recirculan en la instalación. • Para asegurar la máxima reducción de huevos de helminto, los lodos deben pasar por una etapa final antes de su evacuación final (secado térmico, incineración, etc.). • Requiere de un personal más capacitado para su operación. • Los microorganismos que participan el proceso son sensibles a pequeños cambios en su ambiente. • No elimina altas concentraciones de huevos de helminto. • Requiere de una superficie considerable de terreno.

Elaboración propia a partir de las referencias 5, 11, 14, 27, 35.

2) *Digestión anaerobia de alta tasa.*

Durante este proceso se convierte la biomasa en biogás mediante la degradación biológica de la materia orgánica en reactores anaeróbicos completamente mezclados y calefaccionados a temperaturas entre 25°C y 65°C durante períodos de digestión de entre 10 y 20 días con cargas que van desde 1.6 a 3.2 kg SSV/d*m³. El mezclado se puede realizar con agitador o recirculación de gas comprimido, en forma continua o intermitente.

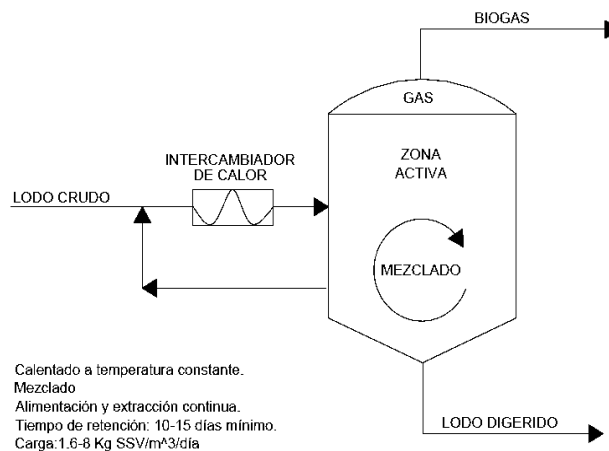


Figura 2.12 Sistema de digestión anaerobia de alta tasa, una etapa. Modificado de Metcalf&Eddy, 2003.



Este proceso se caracteriza por el calentamiento, mezclado auxiliar, espesamiento del lodo crudo y alimentación uniforme. Estos cuatro factores, actúan juntos para crear un ambiente estable y uniforme, es decir, las mejores condiciones para el proceso biológico. El resultado es que los requerimientos de volumen son disminuidos y la estabilidad del proceso incrementada.

El biogás generado se utiliza como combustible principalmente para motores, turbinas de gas, hornos, calderas, estufas y celdas de hidrógeno. Frecuentemente, el sistema de calefacción del reactor funciona con el mismo biogás obtenido del proceso de digestión.

Tabla 2.17 Ventajas y desventajas del sistema de digestión de alta tasa.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Produce metano, como una fuente de energía. • El tiempo de retención es menor a la digestión convencional. • Mayor resistencia a la formación de espumas. • Buena eliminación de microorganismos patógenos. • El lodo estabilizado es fácil de deshidratar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene un alto costo de inversión inicial. • Altos costos de energía. • Al contrario de lo que dice la literatura el proceso es menos estable.

Elaboración propia a partir de las referencias 5, 11, 14, 27, 35.

3) *Digestión anaerobia de dos etapas*

Es una extensión de la digestión de alta tasa que divide las funciones de fermentación y separación sólido-líquido en dos tanques en serie. El primer tanque es un sistema de estabilización de tasa alta con calentamiento y mezclado, mientras que el segundo es para la fase de separación. El segundo digester es similar en diseño al primario, excepto que no tiene calentamiento ni mezclado. Su función principal es la de permitir la concentración por gravedad de los sólidos de lodo digerido y decantación del licor sobrenadante. Lamentablemente, muchos digestores secundarios han funcionado pobremente como espesadores, produciendo lodo diluido y una alta concentración en el sobrenadante. La principal causa del problema es que, en la mayoría de los casos, los lodos digeridos anaerobiamente no se sedimentan fácilmente, por lo que los dos factores que contribuyen a este fenómeno son:

- Flotación de sólidos. El contenido del tanque primario de digestión se puede volver sobresaturado con biogás.
- Alta proporción de partículas de tamaño fino. Los sólidos finos son producidos durante la digestión tanto por el mezclado como en el rompimiento natural del tamaño de las partículas a través de la descomposición biológica. Estas partículas finas se sedimentan pobremente y entran al sobrenadante.

Tabla 2.18 Características físicas y químicas promedio de un sistema digestor de dos etapas.

Componente	Concentración, mg/l ^a Lodo de alimentación	Lodo transferido	Sobrenadante	Lodo estabilizado
pH	5.7	7.7	7.8	7.8
Alcalinidad	758	2318	2630	2760
Ácidos volátiles	1285	172	211	185
Sólidos totales	35600	18200	12100	32800
Sólidos mezclados	9000	6600	3310	12300
Carbohidratos	9680	1550	1020	3100
Grasas	8310	2075	1321	3490
Carbón	15540	6950	4440	10910
Proteínas, como gelatina	18280	11200	6580	17200
Nitrógeno amoniacal como NH ₃	213	546	618	691
Nitrógeno orgánico, como NH ₃	1346	879	564	1455
Nitrógeno total, como NH ₃	1549	1425	1182	2146

^a Excepto pH

Adaptado de la Tabla 2.1 Water Pollution Control Federation. Sludge Stabilization. Manual of Practice No. FD-9 (1985).

La principal desventaja de este tipo de instalación es que es muy cara, ya que, requiere la construcción de dos tanques idénticos y dado que no contribuye a mejorar el proceso, no es muy utilizada.

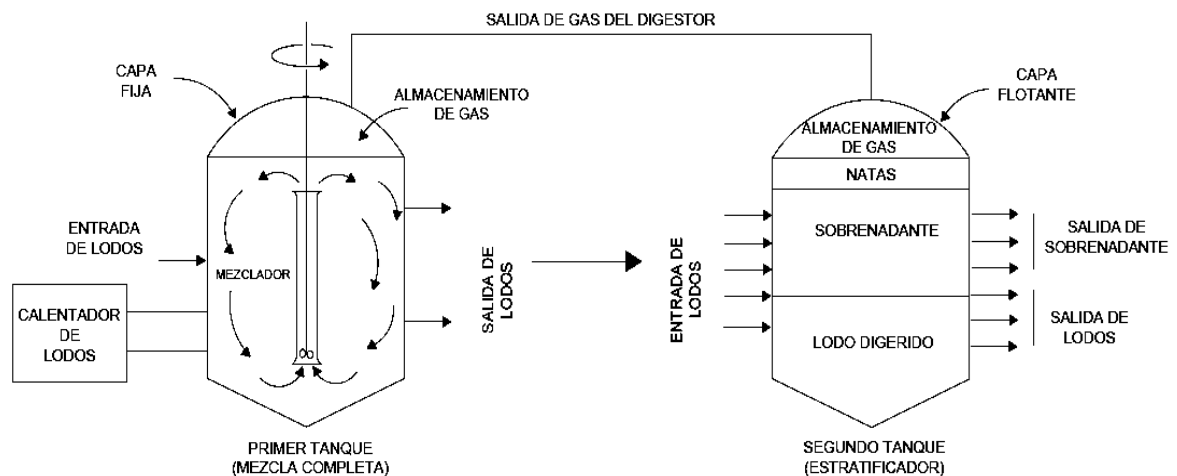


Figura 2.13 Digestor anaerobio de dos etapas. Modificado de Metcalf&Eddy, 2003.



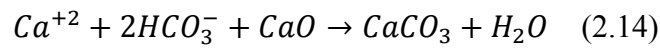
2.4.2.3 Estabilización con cal

En este proceso, la cal se añade en cantidad suficiente a los lodos sin tratar para elevar el pH a 12 o más. El alto pH crea un ambiente que no es propicio para la supervivencia de los microorganismos. En consecuencia, el lodo no se pudre, ni crea olores, o representa un peligro para la salud, siempre y cuando el pH se mantenga a este nivel. Para la estabilización se puede utilizar cal hidratada, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o cal viva, CaO . En algunos casos se puede utilizar las cenizas volantes, polvo de horno de cemento, y cal de carburo como sustituto de la cal.

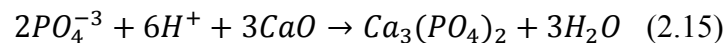
En este proceso las características físicas y químicas del lodo también se alteran debido a las reacciones que se llevan a cabo. La química del proceso no está bien estudiada pero algunas moléculas complejas se transforman por medio de reacciones de hidrólisis y saponificación. Algunas de estas reacciones son:

Reacciones con constituyentes inorgánicos.

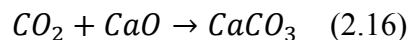
Calcio



Fósforo

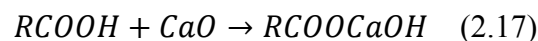


Dióxido de carbono

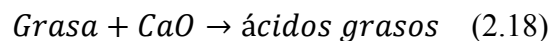


Reacciones con constituyentes orgánicos.

Ácidos



Grasas



Durante la actividad biológica se producen compuestos, como dióxido de carbono y ácidos orgánicos que reaccionan con la cal. Si la cal que se adiciona no es suficiente para detener la actividad biológica se producen estos compuestos que reducen el pH, producen malos olores impidiendo la estabilización del lodo. En este proceso no hay reducción directa de materia orgánica lo que causa dos importantes impactos:



- a) La adición de cal hace al lodo químicamente estable. Si el pH cae por debajo de 11, la descomposición biológica se reanuda, produciendo malos olores.
- b) No hay reducción en la cantidad de lodo para disposición. Por el contrario, la masa del lodo seco aumenta por la adición de cal y por la precipitación química que se deriva del proceso.

Las principales ventajas y desventajas que presenta este proceso son:

Tabla 2.19 Ventajas y desventajas de la estabilización con cal.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Reduce considerablemente los niveles de microorganismos patógenos (99.9% de coliformes fecales y de 0.5 a 2 log en huevos de helminto). • Es un proceso económico, siempre y cuando se utilice para plantas pequeñas (aprox. 200 l/s). • Bajos costos de operación (este varía en función el tipo de lodo que se quiere obtener, ya que si se requiere un lodo con mayor calidad, este costo se incrementa). • Fácil de operar. • Reduce la producción de olores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Recomendable para plantas pequeñas (aprox. 200 l/s), ya que en plantas más grandes incrementa el costo del proceso debido al consumo de cal. • El volumen de los biosólidos se incrementa, lo que ocasiona mayor costo de transporte y tratamiento final. • En la post-estabilización con cal no se destruyen los compuestos orgánicos que permiten un nuevo crecimiento microbiano en los lodos después del tratamiento. • Durante el tratamiento se desprende un fuerte olor a amoníaco.

Elaboración propia a partir de las referencias 1, 5, 11, 14, 24, 27, 35.

Los dos métodos de estabilización con cal más usados son:

1) *Pre-tratamiento con cal*

El pre-tratamiento de los lodos líquidos requiere más cal por unidad de peso de lodo procesado que la necesaria para la deshidratación. Es necesario adicionar una gran cantidad de cal para poder alcanzar un alto pH. Además, se debe proporcionar el suficiente tiempo de contacto antes de la deshidratación a fin de lograr un alto nivel de agentes patógenos muertos. También se recomienda mantener el pH por encima de 12, aproximadamente durante dos horas a fin de asegurar la destrucción de patógenos (criterios mínimos de la EPA para la estabilización con cal) y proporcionar la suficiente alcalinidad residual de manera que el pH no descienda por debajo de 11 durante varios días. Si el pH disminuye por debajo de 11, la actividad microbiana se reanuda, así como, la descomposición del material orgánico, produciendo malos olores.

En la siguiente tabla se muestran las dosis de cal recomendadas para diferentes tipos de lodos. Sin embargo, se recomienda determinar las dosis de cal experimentalmente.



Tabla 2.20 Dosis requerida de cal para la estabilización a pH de 12 por 30 minutos.

Tipo de lodo	Concentración de sólidos, %.	^a Dosis de cal, lb Ca(OH) ₂ / lb sólidos secos		pH promedio	
		Rango	Promedio	Inicial	Final
Primario	3 – 6	0.06 – 0.17	0.12	6.7	12.7
Activado	1 – 1.5	0.21 – 0.43	0.30	7.1	12.6
Séptica	1 – 4.5	0.09 – 0.51	0.20	7.3	12.7
Anaerobia	6 – 7	0.14 – 0.25	0.19	7.2	12.4

^a Numéricamente equivalente a kg Ca(OH)₂ por kg de sólidos secos.

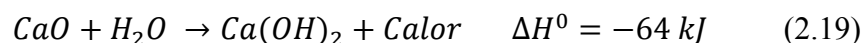
Modificado del tratamiento y disposición de lodos, EPA (1978).

Generalmente, como el porcentaje de concentración de sólidos aumenta, la cantidad de cal requerida disminuye para tener un incremento de temperatura constante.

Debido a que la estabilización con cal no destruye los orgánicos necesarios para el crecimiento bacteriano, el lodo puede ser tratado con un exceso de cal o eliminarse antes de que el pH disminuya significativamente. También se puede añadir un exceso de cal de hasta 1.5 veces la cantidad necesaria para mantener el pH inicial de 12.

2) *Post-tratamiento con cal*

En este proceso la cal hidratada o viva se añade a los lodos deshidratados y se mezcla por medio de un transportador de tornillo o un mezclador de paleta a fin de elevar el pH de la mezcla. Se recomienda usar la cal viva por dos razones, la primera es que la reacción entre la cal viva y el agua es exotérmica y puede elevar la temperatura de la mezcla por encima de 50°C, suficiente para inactivar los huevos de gusano; la segunda razón, es que parte del agua contenida se une químicamente al calcio lo que beneficia el secado el lodo.



El post-tratamiento, tiene varias ventajas con respecto al pre-tratamiento:

- Se puede utilizar cal seca, por lo tanto, no es necesario añadir agua adicional a los lodos deshidratados.
- Se eliminan los problemas de escala y de mantenimiento asociados al equipo de deshidratación de lodos con cal.
- Reduce la producción de olores.
- Reduce los niveles de microorganismos patógenos.
- Mejora las características de desaguado del lodo.

Un sistema de estabilización post cal consta típicamente de un sistema de alimentación de cal seca, una transportadora de lodo deshidratado y un mezclador de cal y lodos. Es importante

obtener una buena mezcla para asegurar el contacto entre la cal y las pequeñas partículas de lodos. Cuando la cal y el lodo están bien mezclados, la mezcla resultante tiene una textura quebradiza, lo que le permite ser almacenado durante largos períodos de tiempo o ser fácilmente distribuidos en la tierra por un esparcidor de estiércol convencional.

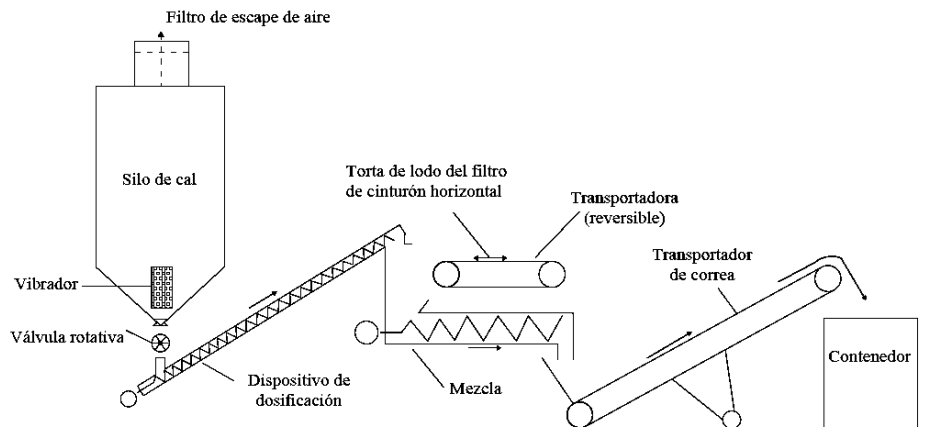


Figura 2.14 Sistema típico de post-tratamiento con cal. Modificado del Metcalf&Eddy, 2003.

Algunas investigaciones demuestran que la estabilización con cal, ya sea por pre-tratamiento o post-tratamiento, reducen los coliformes fecales en concentraciones mayores al 99.9%, si estos mantienen un pH arriba de 12.

2.4.2.4 Compostaje

Este proceso implica la destrucción de la materia orgánica junto con la producción de ácido húmico para producir un producto final estabilizado. Aproximadamente del 20-30% de los sólidos volátiles se convierten en dióxido de carbono y agua. Conforme se lleva a cabo la descomposición de la materia orgánica la temperatura se eleva de 50 a 70°C, permitiendo así la eliminación de microorganismos patógenos entéricos (*Salmonella spp*, *Escherichia* y del género *Campylobacter*).

El compostaje se puede llevar a cabo en condiciones aerobias o anaerobias, sin embargo, en muchos casos se emplea el compostaje aerobio, ya que, en este se acelera la descomposición de la materia orgánica ocasionando un aumento en la temperatura, lo que permite la destrucción de patógenos y reduce al mínimo la posibilidad de malos olores.

Algunos factores que afectan los tipos de sistemas de compostaje son: la naturaleza de los lodos producidos, el proceso de estabilización, el tipo de equipo de deshidratación y químico utilizado. Los lodos que se estabilizan mediante la digestión aeróbica o anaeróbica antes de compostaje pueden reducir el tamaño de las instalaciones de compostaje hasta en un 40%.



Los microorganismos involucrados se dividen en tres grandes categorías: bacterias, actinomicetos y hongos. Aunque la interrelación de estas poblaciones microbianas no es clara, la actividad bacteriana parece ser la responsable de la descomposición de proteínas, lípidos y grasas a temperaturas termófilas, así como de la mayor parte de energía producida. Los hongos y actinomicetos también están presentes en diferentes niveles durante las etapas mesófilas y termófilas de compostaje y parecen ser responsables de la destrucción del complejo orgánico.

Durante el proceso de compostaje, se observan tres etapas: la mesófila, la termófila y de enfriamiento. En la etapa mesófila, donde la temperatura aumenta desde la temperatura ambiente hasta 40°C aproximadamente con la aparición de hongos y bacterias productoras de ácido; como la temperatura en el compostaje aumenta a la gama termófila, de 40 a 70°C, estos microorganismos son remplazados por bacterias termófilas, actinomicetos y hongos termófilos.

En el intervalo de temperatura termófila en donde se produce la degradación máxima y la estabilización de materia orgánica. La etapa de enfriamiento se caracteriza por tener una reducción de la actividad microbiana y la sustitución de organismos termófilos por bacterias mesófilas y hongos. Durante el período de enfriamiento, se produce la estabilización del pH y la formación del ácido húmico.

La mayoría de los procesos de compostaje consisten en las siguientes etapas:

- Pre-procesamiento, mezcla de lodo deshidratado con una enmienda y/o agente abultante.
- Descomposición de alta velocidad; airear la pila de compost, ya sea por la adición de aire, por giro mecánico, o por ambos.
- Recuperación del agente abultante (al final de la descomposición de alta velocidad o de la fase de curado, si es posible).
- Mayor tiempo de curado y almacenamiento, lo que permite una mayor estabilización y enfriamiento del compost.
- Post-procesamiento; cribado para la eliminación de material no biodegradable como metales y plásticos o molienda para reducción de tamaño.
- Disposición final. Una porción del producto final a veces se recicla a la etapa de pre-procesamiento para ayudar en el acondicionamiento de la mezcla de compost.

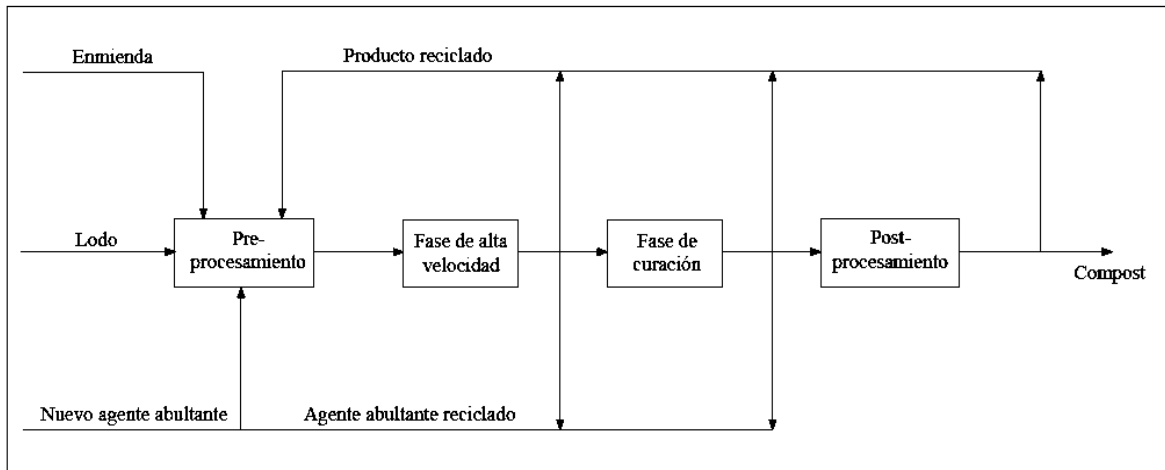


Figura 2.15 Diagrama de proceso general para el compostaje que muestran entradas de lodos, enmiendas, y agentes de carga. Modificado del Metcalf&Eddy, 2003.

La etapa de descomposición de alta velocidad ha sido dirigida para reducir los olores, suministrar altas tasas de aireación, y mantener el control del proceso. Por otra parte, la etapa de curado necesita ser diseñada y operada adecuadamente para producir un producto de compost maduro. Los tres métodos usados para el compostaje de lodos son:

1) *Pila estática aireada*

Consiste en la disposición del material a compostar en pilas, o pequeñas montañas alargadas. El aire es proporcionado por ventiladores; en la parte inferior de la pila se colocan tuberías con orificios a través de los cuales se descarga el aire. Se denomina proceso estático pues una vez realizado el montaje no se altera hasta que el proceso se haya completado.

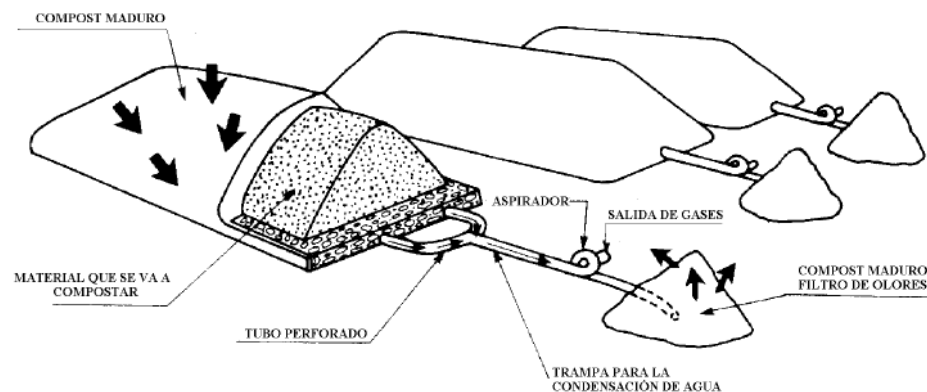


Figura 2.16 Sistema de pilas estáticas con aireación forzada. Tomado de Metcalf&Eddy, 2003.



El compostaje en pila estática aireada es un proceso batch y a medida que transcurre el tiempo ocurren cambios en el sistema, la materia orgánica es degradada biológicamente por los microorganismos aerobios, el agua contenida en el material a compostar se evapora al ambiente y la temperatura de la pila cambia.

Los componentes de una pila estática aireada incluyen; una red de distribución de aire, una capa base de un material con elevada porosidad y el material a compostar. El material poroso ayuda a prevenir el atasco de los agujeros de aire y ayuda a difundir mejor el flujo que sale o entra en la tubería. La capa exterior aísla la tubería; separa a las moscas y otras plagas del material a compostar; y ayuda a retener los olores, el NH_3 y el agua.

El proceso de compostaje se lleva a cabo de 21 a 28 días y por lo general, es seguida por un periodo de curación de 30 días o más. Las alturas típicas para las pilas son de 2 a 2.5 m.

Este sistema usualmente se utiliza para compostar un material con alto contenido de humedad, por lo que se mezcla con algún tipo de “agente abultante”, que proporciona aberturas para que el aire impulsado por el ventilador fluya a través del sistema, de estructura a la pila y en caso de ser necesario absorba parte del agua contenida en el material húmedo. Este agente de carga también se coloca en la base de la pila para mejorar la distribución del aire que sale de los agujeros de la tubería hacia el sistema.

Las principales ventajas de este sistema son los buenos controles de oxígeno y temperatura, que permiten una rápida transformación de los residuos orgánicos en compost, y conlleva a un uso más eficiente del espacio, además no requiere de mucho personal. Sus desventajas es que se debe prestar especial atención a las características de los sustratos a compostar, puede haber posibles problemas de compactaciones, cortocircuitos en el sistema de aire y de descomposición inconsistente en el lote de compost.

2) *Compostaje en hileras volteadas*

En este proceso, las hileras son construidas de 1 a 2 m de altura y de 2 a 4.5 m de base. Para la elección del tamaño de la pila se debe tener en cuenta la proporción de los materiales fácilmente degradables presentes en el residuo y en la porosidad del mismo. Las filas se mezclan periódicamente durante el proceso de compostaje. El período de compostaje aproximadamente es de 21 a 28 días. Bajo condiciones típicas de operación, las hileras se voltean un mínimo de cinco veces mientras que la temperatura se mantiene en o por arriba de los 55°C .

En el compostaje en hileras, las condiciones aerobias son difíciles de mantener en la zona de sección transversal de la hilera. Por lo tanto, la actividad microbiana dentro de la pila puede ser aerobia, facultativa, anaerobia, o de diversas combinaciones de los mismos, en función de cuándo

y con qué frecuencia la pila se voltee. La liberación de olores se produce normalmente cuando las condiciones anaerobias se desarrollan dentro de la hilera.

Este tipo de sistemas presentan las ventajas de conseguir una mayor homogenización del material, una disminución mecánica del tamaño medio de partícula que contribuye a una mayor disminución de volumen y una mayor garantía de higienización del material al conseguirse que todo el material pase por fases termófilas tras algunos de los volteos. Por el contrario presentan la gran dificultad de controlar su temperatura, posibles problemas de déficit de oxígeno en capas profundas, si la estructura no es la adecuada y el elevado costo de las máquinas volteadoras.



Figura 2.17 Compostaje en sistema de hileras volteadas. Tomado de <http://blog.ecocelta.com/visita-fotografica.html>, (Consulta 20 abril de 2014).

3) *Compostaje en recipientes*

Este proceso se lleva a cabo dentro de un contenedor o recipiente cerrado. Donde los sistemas mecánicos están diseñados para minimizar los olores y el tiempo de proceso mediante el control de las condiciones ambientales, como el flujo de aire, la temperatura, y la concentración de oxígeno. El compostaje en recipientes se puede dividir en dos categorías: flujo pistón y dinámico (lecho agitado):

- En el *flujo pistón*, la relación entre las partículas de la masa de compostaje sigue siendo el mismo durante todo el proceso, y el sistema funciona sobre el principio *primero entra-primero sale*.
- En el sistema *dinámico*, el material de compostaje se mezcla mecánicamente durante el proceso.

El sistema de compostaje en recipientes se puede clasificar en base a la forma geométrica de los recipientes utilizados (Ver Fig. 2.18).

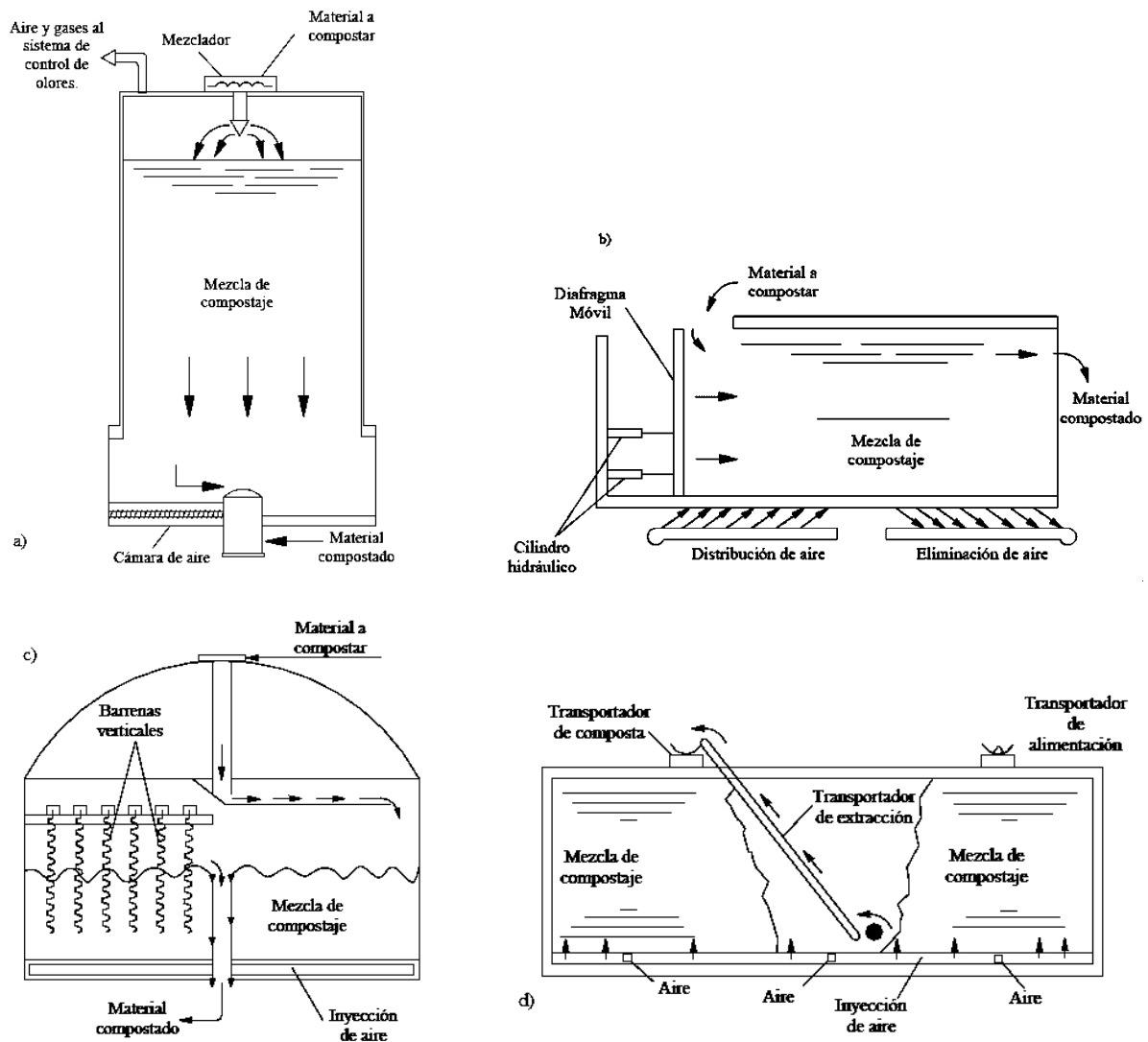


Figura 2.18 Reactores para compostaje. a) Reactor de flujo pistón sin mezcla vertical, b) Reactor de flujo pistón sin mezcla horizontal, c) Reactor con mezcla dinámica vertical, d) Reactor con mezcla dinámica horizontal. Tomado de Metcalf&Eddy, 2003.

Las ventajas de este sistema de compostaje es que tiene un buen control de olores, su rendimiento es más rápido, los costos de mano son más bajos.

2.4.3 Acondicionamiento

Consiste en el tratamiento químico para mejorar la eficiencia de los procesos de espesado o desaguado. Este se realiza con el expreso motivo de mejorar sus características de deshidratación. Los métodos más usados suponen la adición de sustancias inorgánicas,



polielectrolitos orgánicos, o ambos, además del tratamiento térmico. A continuación se explica en que consiste cada uno de estos métodos.

1) *Acondicionamiento químico*

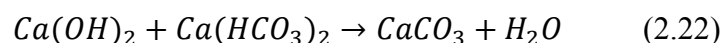
El uso de productos químicos para acondicionar el lodo para su deshidratación resulta económico para obtener los mayores rendimientos. Este proceso da como resultado la coagulación de los sólidos y la liberación del agua absorbida. El acondicionamiento se usa antes de la filtración en vacío y la centrifugación.

Los productos químicos empleados son cloruro férrico, cal, sulfato de alúmina y polímeros orgánicos. El cloruro férrico y la cal son utilizados principalmente para acondicionar el lodo activado, ya sea solo o combinado con lodos primarios. Las ventajas de la cal es que provee una desinfección y estabilización del lodo al reducir el riesgo de daño a la salud y los olores. Los polielectrolitos orgánicos o “polímeros” se utilizan para procesos tanto de espesamiento como de deshidratación. La principal ventaja de los polímeros sobre los químicos inorgánicos es que los polímeros no aumentan significativamente la producción de lodo. Cada kilogramo de químicos inorgánicos adicionado en el acondicionamiento produce un kilogramo adicional de lodo, pero por otra parte, los polímeros no proporcionan una desinfección pero son más fáciles de alimentar y frecuentemente más económicos.

El acondicionamiento químico inorgánico normalmente está asociado con los filtros al vacío y los filtros prensa. Los químicos inorgánicos normalmente utilizados en los filtros prensa son cloruro férrico y cal con polímero. El cloruro férrico reacciona con la alcalinidad del bicarbonato en el lodo para formar complejos de hidróxido férrico que funcionan como un agregado. La reacción química se puede representar de la siguiente manera:



La formación de ácido produce una disminución del pH, hasta un nivel del orden de 6. La adición de cal sube el pH del lodo hasta 8.5, permitiendo así que la reacción del cloruro férrico sea más eficiente en la formación de hidróxidos. La cal también reacciona con el bicarbonato para formar carbonato de calcio ($CaCO_3$), una estructura granular que proporciona porosidad al lodo, requerida para aumentar la tasa de remoción de agua del lodo, durante la filtración a presión. La reacción química que se lleva a cabo es:





Las dosis óptimas de cloruro férrico y cal, para el acondicionamiento de lodo dependen de las características del lodo. En general, las dosis de cloruro férrico van desde 2% hasta 10% de los sólidos y la cal desde 5% hasta 40%, ambas basadas en sólidos secos. Como se muestra en la Tabla 2.21, los lodos activados y los lodos digeridos aerobiamente requieren mayor dosis de cloruro férrico; los lodos digeridos anaerobiamente requieren una dosis media; y los lodos crudos primarios una dosis menor. El lodo primario requiere menos cal que los lodos activados y los digeridos aerobiamente.

Tabla 2.21 Dosis típicas de cloruro férrico y cal para la deshidratación de lodos de aguas residuales municipales.

Aplicación	Tipo de Lodo	Cloruro Férrico (kg/ton)	Cal (kg/ton)
Filtro a vacío	Primario crudo	20 – 40	80 – 100
	LAP crudo	60 – 100	0 – 160
	(Primario + FR) crudo	20 – 40	90 – 120
	(Primario + LAP) crudo	25 – 60	90 – 160
	(Primario + LAP + Séptico) crudo	25 – 40	120 – 150
	(Primario + LAP + Cal) crudo	15 – 25	Ninguno
	Primario digerido anaerobio	30 – 50	100 – 130
	Primario + FR digerido anaerobio	40 – 60	125 – 175
Filtro prensa a presión	(Primario + LAP digerido anaerobio)	30 – 60	150 – 210
	Primario crudo	40 – 60	110 – 140
	LAP crudo	70 – 100	200 – 250
	Primario + LAP digerido anaerobio	40 – 100	110 – 300
	LAP digerido anaerobio	80	400
	Primario crudo + FR + LAP	83	196
LAP – Lodo Activado Purgado		FR – Filtro Rociador	

Tomado de Metcalf&Eddy, 2003

Los químicos orgánicos utilizados para el acondicionamiento de lodos son principalmente polímeros orgánicos sintéticos. Las ventajas que tiene el utilizar los polímeros son:

- No adicionan volumen apreciable al lodo que se tiene que disponer.
- No disminuyen el valor calorífico del lodo que será incinerado.
- Su operación y mantenimiento es más sencillo que los inorgánicos, que requieren limpieza frecuente del equipo, normalmente con baños ácidos.

Las reacciones químicas de los polímeros son similares a las de los químicos inorgánicos. En este proceso las moléculas largas de los polímeros se fijan por medio de adsorción a dos o más partículas de lodo al mismo tiempo. Los polímeros orgánicos más utilizados son de cadenas largas y solubles en agua. La poliacrilamida (C₃H₅NO)_n, es el polímero más utilizado. Estos polímeros líquidos son muy viscosos, extremadamente frágiles y difíciles de mezclar en solución



acuosa. A medida que aumenta el peso molecular, también aumenta la dificultad en el mezclado y dilución del polímero.

Los polímeros se pueden conseguir en cinco diferentes formas físicas: secos, líquidos, emulsiones, mannich (un tipo especial de solución) y gel. Los polímeros tienen tres tipos de carga: catiónica, aniónica y no iónica. Una vez que los polímeros, en cualquier forma, han sido diluidos, la solución es estable por sólo 24 horas. Los polímeros secos, emulsiones y gel se obtienen para todos los tipos de carga; el tipo mannich y líquido sólo para la forma catiónica.

Tabla 2.22 Dosis típicas de polímero para el espesamiento y deshidratación de biosólidos.

Aplicación	g de polímero seco/ kg de sólidos secos
Proceso de espesamiento	
Gravedad	2 – 7
Flotación por aire disuelto	0 – 15
Banda de gravedad	2 – 5
Centrífuga	0 – 8
Tambor rotatorio	2 – 7
Proceso de deshidratación	
Filtro banda	3 – 6
Centrífuga	2 – 10
Filtro a vacío	5 – 10
Filtro prensa	2 – 3
Lechos de secado	15 – 25

Modificado de Marcel Dekker, 1996.

Los factores que intervienen en la selección del tipo y dosis de los agentes de acondicionamiento son:

- Las propiedades de los sólidos (la concentración, el pH, la alcalinidad, su origen y la edad). El pH y la alcalinidad pueden afectar el rendimiento de los agentes de acondicionamiento, en particular, a los acondicionadores inorgánicos.
- El tipo de mezcla. El mezclado íntimo del lodo y del coagulante es esencial para un buen acondicionamiento. Los tanques que se utilizan para este fin, por lo general, son de tipo vertical en plantas pequeñas y horizontales en plantas grandes, aunque también se usan tanques cilíndricos con mezcladores de hélice.
- Los dispositivos de deshidratación. Ocurre debido a las diferencias en el equipo de mezcla utilizada por diferentes vendedores y las características particulares de los métodos de deshidratación. Por ejemplo, los polímeros se utilizan comúnmente en la centrífuga y prensa tipo banda, pero se utilizan con menos frecuencia para la filtración a presión.



En general, la dosis de producto químico requerida para cualquier tipo de lodo se determina en el laboratorio mediante ensayos que no solo permiten determinar la dosis de producto químico a utilizar sino también permite conocer los rendimientos de los filtros así como la capacidad de los distintos medios filtrantes.

2) Tratamiento térmico

Es un proceso que consiste en calentar el lodo durante cortos periodos de tiempo bajo presión. Este tratamiento da como resultado la coagulación de los sólidos, rotura de la estructura gel y una reducción de la afinidad del agua por parte de los sólidos del lodo. Como consecuencia de ello, el lodo es esterilizado, prácticamente desodorizado, deshidratándose fácilmente en filtros de vacío o filtros prensa sin adición de productos químicos. Algunas de las ventajas y desventajas más importantes de este proceso se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.23 Ventajas y desventajas del tratamiento térmico.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">• El contenido de sólidos del lodo deshidratado puede variar de 30 a 50%, dependiendo del grado de oxidación alcanzado.• El proceso es relativamente insensible a los cambios en la composición de los lodos.	<ul style="list-style-type: none">• Alto costo de inversión debido a su complejidad mecánica y al uso de materiales resistentes a la corrosión.• Requiere de mucha supervisión, de operadores calificados y de un buen programa de mantenimiento preventivo.• El proceso causa corrientes laterales con altas concentraciones de compuestos orgánicos de nitrógeno y amoníaco.• Se producen gases olorosos que requieren contención, tratamiento y/o destrucción.• La formación de incrustaciones en los intercambiadores de calor, tuberías y reactores requieren de un lavado ácido o de chorros de agua a alta presión.

Elaboración propia a partir de las referencias 5, 11, 14, 27, 35, 37.

Hay dos tipos de tratamientos térmicos conocidos; *Porteus* y *Zimpro*, los cuales conllevan una oxidación húmeda del lodo, consistente en una oxidación química de los sólidos orgánicos en fase acuosa, por oxígeno disuelto, en reactores que funcionan a eleva temperatura y presión.

El proceso *Porteus* incluye el funcionamiento en continuo a presiones de 12 a 15 kg/cm² y temperaturas aproximadamente de 200°C. Después de pasar por un triturador, el lodo se bombea desde el depósito de acumulación a través de un intercambiador térmico, donde se calienta por medio del lodo caliente de salida del reactor. En el reactor se inyecta vapor a alta presión. El tiempo de residencia en el reactor es de unos 30 minutos, el lodo se conduce a través del intercambiador de calor a un tanque de decantación. Con este sistema se puede conseguir una

reducción del 80-90% en la materia orgánica, encontrándose parte de materia orgánica y amonio entre los productos finales. El lodo sedimentado puede filtrarse a un contenido de sólidos de 40-50%.

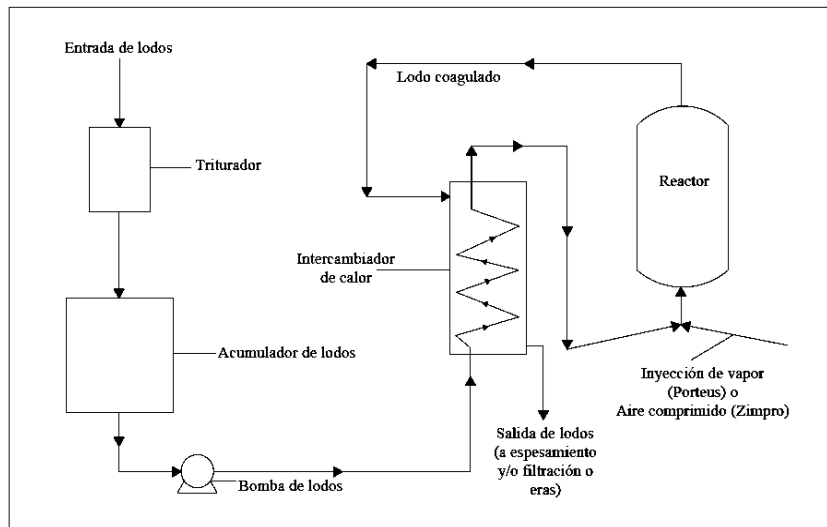


Figura 2.19 Diagrama de flujo combinado de los procesos de Zimpro y Porteus. Modificado de Ramalho, 1991.

En el sistema *Zimpro* de baja presión, el lodo se trata como en el proceso *Porteus*, con la única diferencia de que se inyecta aire en el recipiente del reactor junto con el lodo. El recipiente del reactor es calentado por vapor a temperaturas de 150 a 205°C a presiones que oscilan entre 10.5 y 21 kg/cm². El calor liberado durante la oxidación aumenta la temperatura de operación hasta 316°C. La combustión es del orden de 660-770 kcal/kg de aire. El lodo parcialmente oxidado puede deshidratarse por filtración, centrifugación o drenado sobre eras. El contenido en sólidos de lodo deshidratado puede variar del 30 al 50%, según el grado de oxidación.

La capa sobrenadante de líquido filtrado obtenida en estos dos procesos contiene altas concentraciones de compuestos orgánicos solubles en agua y de cadena corta, susceptibles de tratamiento biológico. Este líquido puede ser retornado al agua residual de entrada de la planta para su tratamiento biológico o ser tratado en otra instalación.

2.4.4 Deshidratación

Este proceso se utiliza para reducir el contenido de humedad del lodo, de forma que pueda manipularse y procesarse como un semisólido. La elección del sistema de deshidratación es función de la tipología de lodo producido y del espacio disponible para el tratamiento. El objetivo de la deshidratación es:

- Reducir los costos de transporte y disposición.



- Permite mayor facilidad en la manipulación (utilización de tractores, palas cargadoras, cintas transportadoras).
- Facilita la posterior incineración del lodo.
- En lodos procedentes de una planta de tratamiento de aguas residuales permite obtener un lodo con menos olores y menor grado de putrefacción.

Los procesos de deshidratación requieren de un acondicionamiento previo de los lodos. Este acondicionamiento consiste en la adición de sustancias químicas, tales como cloruro férrico (para lodos biológicos), cal (para lodos primarios) o polielectrolitos orgánicos. Los métodos de deshidratación se clasifican como:

- *Estáticos*: Lechos de secado y lagunas.
- *Mecánicos*: Filtro prensa, filtro banda, filtro a vacío y centrífuga.

Los métodos de deshidratación mecánicos son comúnmente más para el tratamiento de los lodos, por lo que, en la siguiente tabla se muestran algunas de las características generales que presentan estos equipos.

Tabla 2.24 Características técnicas de los equipos de deshidratación mecánicos.

Proceso	Filtro a vacío	Centrífuga	Filtro banda	Filtro prensa
Sequedad, %	20-25	20-25	25-45	40-50
Rendimiento, Kg SS/m ² /h	18-22	-	Variable	3-4
Costo de inversión	Medio	Alto	Bajo	Muy alto
Capacidad de deshidratación, m ³ /h	-	5-150	0.5-36	0.5-8
Proceso de alimentación	Continuo	Continuo	Continuo	Discontinuo
Limpieza interna	-	No requiere	Con agua a presión mediante espreas	Manual

Modificado de la Ref. 52.

A continuación se describen cada uno de los métodos de deshidratación que hay para el tratamiento de los lodos.

2.4.4.1 Lechos de secado

Este es uno de los procesos con mayor antigüedad, práctico y sencillo. El secado al aire de lodos en lechos de arena es uno de los métodos más económicos de eliminación de agua. Este proceso es usado en las plantas de tratamiento pequeñas y medianas de efluentes tanto domésticas como industriales.



La viabilidad económica depende de:

- La disponibilidad de terrenos, a precios accesibles.
- Condiciones climáticas favorables (seco y caluroso) para máxima evaporación.

El área necesaria es función de:

- La precipitación y evaporación previsibles.
- Las características de los lodos (los lodos gelatinosos requieren mayor área).

En el proceso de secado de lodos en lechos de arena actúan dos mecanismos:

1. *Percolación (o infiltración)* de agua a través del lecho de arena. La proporción de agua eliminada por este mecanismo es del 20-55%, dependiendo del contenido inicial de sólidos en el lodo y de las características de los sólidos. La percolación suele completarse en 1 a 3 días, resultando en una concentración de sólidos del 15-25%.

2. *Evaporación de agua.* A través de los mecanismos de radiación y convección. La velocidad de evaporación es más lenta que la percolación y depende de la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire.

Durante el periodo constante, la superficie del lodo está húmeda, siendo la velocidad de evaporación relativamente independiente de la naturaleza del lodo. La evaporación continúa a velocidad constante hasta que se alcanza una humedad crítica. Cuando se alcanza la humedad crítica el agua no emigra a la superficie del lodo con la misma rapidez con que se evapora, con lo que empieza el periodo de disminución. La velocidad de secado en este periodo depende del espesor del lodo, propiedades físicas y químicas así como de las condiciones atmosféricas. El secado por debajo de la superficie continúa hasta que se alcanza una humedad de equilibrio.

Para que se pueda eliminar la mayor cantidad de agua del lodo, este va a depender de los siguientes factores:

- Las características de lodo a deshidratar.
- Contenido inicial de materia seca.
- Las condiciones climáticas del lugar.
- Espesor inicial del lecho.
- La naturaleza del material drenante.

La Figura 2.20 indica un esquema típico de construcción de lecho de arena. Los tubos para drenaje deben de tener un diámetro interior mínimo de 10 cm, con una pendiente mínima del 1%. El filtrado se retorna a la planta de tratamiento. Los lodos se suelen disponer en los lechos de

secado con profundidades (espesores) de 20 a 40 cm de grava con granulometría de 0.3 a 2.3 mm y una capa de arena de 10 a 20 cm con una granulometría de 0.3 a 1.2 mm, dejándose secar hasta alcanzar un contenido en sólidos entre el 30 y el 50%. Se recogen cuando alcanzan un estado que facilite dicha operación y que varía con la opinión del personal y el medio final de evacuación o tratamiento.

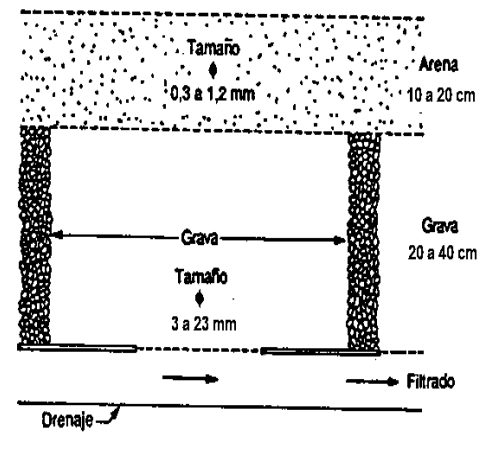


Figura 2.20 Lecho de secado de arena (Eras). Tomado de Ramalho, 1991.

El periodo de tiempo entre la entrada de los lodos y la recolección de sólidos en estado adecuado, varía entre 20 y 75 días, según la naturaleza del lodo, siendo posible reducirlo si se hacen tratamientos previos con coagulantes químicos, con alúmina y polielectrolitos. Con pre-tratamientos químicos se puede reducir el tiempo de secado hasta en un 50%, siendo además posible aplicar los lodos con mayores espesores. Algunas de las ventajas y desventajas del proceso de lechos de secado se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 2.25 Ventajas y desventajas del proceso de lechos de secado.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • El costo inicial es bajo para plantas pequeñas (200 l/s), donde no es necesario un control estricto de lixiviados y hay terreno disponible. • Requerimientos mínimos de operación y capacitación. • Bajo consumo de energía eléctrica. • Baja sensibilidad a la variabilidad del lodo. • Bajo consumo de sólidos en la torta seca de lodos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere de grandes superficies de terreno. • Alta visibilidad al público en general. • Impacto del clima sobre el diseño. • Requerimiento de lodo estabilizado. • Molestia por olores. • Numerosa mano de obra para la remoción de lodos secos. • Posible contaminación de aguas freáticas. • Costos de combustibles y equipos para la limpieza del sistema de lechos.

Elaboración propia a partir de las referencias 5, 11, 14, 27, 30, 35, 44.

2.4.4.2 Filtro Prensa

Este equipo es operado como un proceso por lotes. El lodo se bombea al filtro prensa, que hace pasar al líquido a través del medio filtrante y deja una torta de lodo concentrado entre las placas del filtro. El filtrado se drena hacia los conductos internos y se recolecta en el extremo de la prensa para ser descargado. Finalmente, las placas se separan y la torta cae al suelo. La deshidratación se realiza forzando la evacuación del agua presente en el lodo mediante la aplicación de presión, que oscila entre 3.5 y 1.6 kg/cm². Entre más densa es la torta es más fácil de incinerar, y entre más ligera es más fácil transportarse, y si se usó cloruro férrico para su acondicionamiento está relativamente libre de olores.

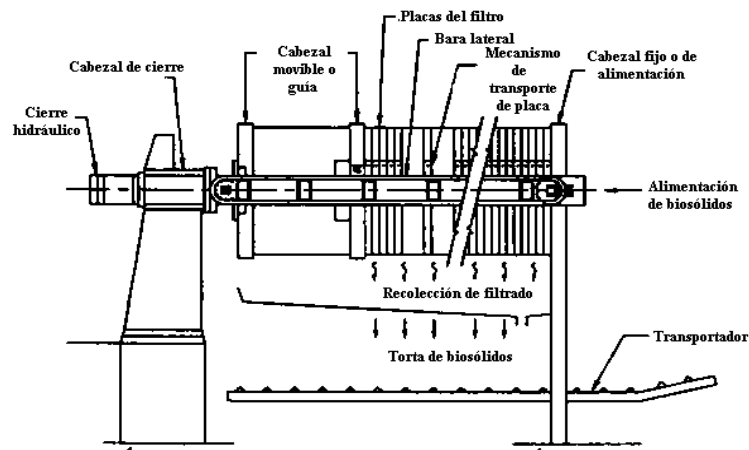


Figura 2.21 Filtro prensa. Modificado de Marcel Dekker, 1996.

La selección de la filtración a presión o filtración a vacío, después de una digestión anaerobia, se deben de evaluar los factores económicos y otras consideraciones incluyendo tipo de lodo, tamaño de la planta de tratamiento y el método de disposición final de la torta. Las ventajas y desventajas que presenta en la siguiente tabla.

Tabla 2.26 Ventajas y desventajas del filtro prensa.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo de inversión. • Mayor superficie de filtración (placas en paralelo). • Baja concentración de sólidos suspendidos en el filtrado, ordinariamente de 10 mg/l, y una torta más seca con 40 a 50% de sólidos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Su funcionamiento es discontinuo. • Dificultad para llenar los armazones en caso de una mala filtración. • Elevado costo de mano de obra.

Elaboración propia a partir de las referencias 5, 11, 14, 27, 30, 35.

2.4.4.3 Filtro Banda

Este equipo consta de dos cintas de tela sin fin que convergen en forma de cuña, y son conducidas por rodillos mientras presionan mutuamente.

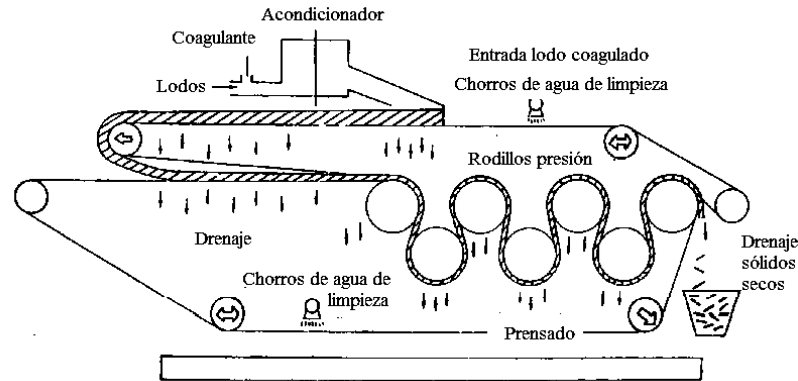


Figura 2.22 Filtro tipo banda. Tomado de Hernández, M. A. (1998).

El lodo se mezcla con el floculante y se condiciona en un tambor mezclador que gira con regulación continua de velocidad. En la prensa, el proceso de extracción de agua del lodo se realiza en tres zonas; de filtraje, cuneiforme y de presión. Las cintas o bandas sin fin son totalmente plásticas y con costuras, se pueden cambiar rápidamente extrayéndolas. La velocidad de la cinta es regulable entre 1.5 y 9 m/min.

La prensa está diseñada para obtener concentraciones de salida óptimas entre 25-45% de materia totalmente seca. La concentración de la salida se puede regular, bien sea por variación de la velocidad de avance de las bandas-tamices o actuando sobre la tensión de la misma. Pueden tratarse lodos primarios y biológicos, digeridos y sin digerir. Las ventajas y desventajas que presenta este sistema frente a otros son:

Tabla 2.27 Ventajas y desventajas del filtro banda.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> Ahorro de energía. Es un proceso continuo. Ahorro de floculante. Se obtiene una concentración del 25-45% de materia seca. Bajo costo de operación y mantenimiento. Ahorro en personal, debido a su facilidad de manejo. Requiere de un menor espacio para su instalación. Bajo costo de inversión. 	<ul style="list-style-type: none"> Sensible a cambios en las características del lodo. Sensible a efectos de corrosión y/o abrasión.

Elaboración propia a partir de las referencias 5, 11, 14, 27, 30, 35.



2.4.4.4 Filtración a vacío

Este método permite obtener una torta de lodo tanto crudo como digerido uniformemente deshidratado sin importar las condiciones climatológicas. La concentración mínima de sólidos generalmente aceptable para una filtración económica es del 4%. El lodo deshidratado puede ser destinado para su eliminación final, venta, uso como acondicionador de suelos o fertilizante de baja calidad, sometido a secado térmico y/o incineración. El líquido filtrado contiene una alta concentración de sólidos finos suspendidos y se mezcla con el agua residual sin tratar que entra a la planta.

En la filtración a vacío se requiere de un diferencial de presión a través de un medio filtrante para lograr que el agua del lodo atraviese el medio y que los sólidos se retengan y formen una torta. La diferencia de presión es el vacío que se aplica al medio filtrante en el lado opuesto al de la aplicación de los lodos. Este proceso por lo general es continuo, el abastecimiento constante de lodo produce una descarga continua de torta y de filtrado.

Se requiere acondicionar el lodo adicionando cloruro férrico, cal o polielectrolitos catiónicos o aniónicos para facilitar la deshidratación, las dosis varían dependiendo del tipo de lodo, de la cantidad de materia volátil y de la alcalinidad del lodo.

Tabla 2.28 Dosificación de acondicionadores para la filtración a vacío.

Tipo de lodo	Lodos frescos		Lodos digeridos		Lodos estabilizados	
	FeCl ₃	CaO	FeCl ₃	CaO	FeCl ₃	CaO
Primarios	4	8	4	10	5	12
Primarios y activados	5	10	5.5	12	6	14
Activados	7	15			6.5	15
Dosificación con polielectrolitos aniónicos			1-3% de la M.S			
Dosificación con polielectrolitos catiónicos			1-5% de la M.S			

Tomado de Metcalf&Eddy, 2003.

Los filtros están formados por un tambor rotatorio, al cual se le aplica vacío (aproximadamente de 30 a 65 cm de mercurio) para extraer la mayor cantidad de agua del lodo y obtener una torta con bajo contenido de humedad. Las velocidades normales de rotación de los tambores van desde 8 a 15 rpm. En este proceso se utilizan distintos tipos de medios filtrantes, tales como tejidos de nylon y dacrón, malla metálica y muelles metálicos densamente entrelazados.

Para determinar el tamaño del filtro, se debe tomar en cuenta el contenido de humedad deseado en la torta de lodo, que puede reducirse hasta un 75-80% (el espesor de la torta es de 5 a 20 mm).

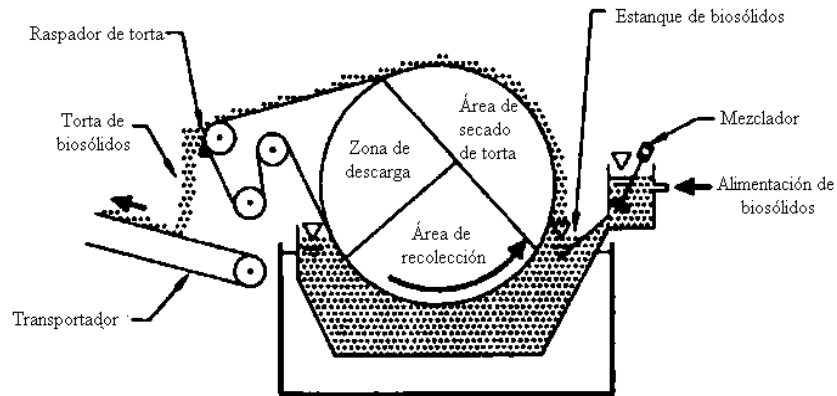


Figura 2.23 Filtro rotatorio de vacío. Modificado de Marcel Dekker, 1996.

Cuando no se conoce el tipo de filtro que se utilizará ni la calidad de lodo, se recomienda una carga de filtración $17 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{hora}$.

Tabla 2.29 Carga de lodos para el filtro a vacío.

Tipo de lodo	Carga de filtración ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{hora.}$)
Lodo fresco:	
Primario	19.5 a 58.5
Primario + Lecho bacteriano	19.5 a 39.0
Primario + Lodos activados	19.5 a 24.4
Lodo activado (solo)	12.2 a 17.0
Digerido:	
Primario	19.5 a 39.0
Primario + Lecho bacteriano	19.5 a 24.4
Primario + Lodos activados	19.5 a 24.4
Elutriado digerido:	
Primario	19.5 a 39.0
Primario + Lecho bacteriano	19.5 a 24.4
Primario + Lodos activados	19.5 a 24.4

Tomado de Metcalf&Eddy, 2003.

Algunas ventajas y desventajas que tiene este equipo, son:

Tabla 2.30 Ventajas y desventajas del filtro a vacío.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> No requiere de personal especializado. Su operación es continúa. Requiere poco mantenimiento. El filtrado que se obtiene tiene una baja cantidad de sólidos suspendidos. 	<ul style="list-style-type: none"> Mayor consumo de energía por unidad de lodo deshidratado. Requiere de continua supervisión por parte del operador. Ocasiona problemas de ruido, debido a las bombas de vacío.

Elaboración propia a partir de las referencias 5, 11, 14, 27, 30, 35.

2.4.4.5 Centrífuga

En este proceso los lodos se separan en dos fases distintas (un líquido sobrenadante clarificado y un sedimento homogéneo) mediante la aplicación de una fuerza centrífuga. La separación está basada en la diferencia de densidad entre los sólidos del lodo y el líquido circundante. El proceso de desaguado es similar al proceso de clarificación por gravedad. Cabe mencionar que es importante adicionar un polímero para acondicionar el lodo con la finalidad de obtener una buena separación sólido-líquido. Con este equipo se puede conseguir la máxima sequedad del lodo deshidratado y ahorrar en los costos de transporte y eliminación.

La centrífuga de *tazón sólido* es el equipo más usado en la deshidratación de los lodos. En este equipo los lodos se introducen constantemente en el recipiente giratorio, donde se separa en una torta densa (sólido) y una corriente diluida (concentrado). El concentrado contiene, sólidos finos de baja densidad y se devuelve al sistema de tratamiento de aguas residuales. La torta de lodo, que contiene aproximadamente 70 a 80% de humedad, es descargada desde el recipiente por un alimentador de tornillo en una tolva o sobre una cinta transportadora dependiendo del tipo de lodos, la concentración de sólidos en la torta varía generalmente del 10 al 30%. Las tortas de lodos con concentraciones por encima del 25%, son deseables para su eliminación mediante incineración o para ser transportados a un relleno sanitario.

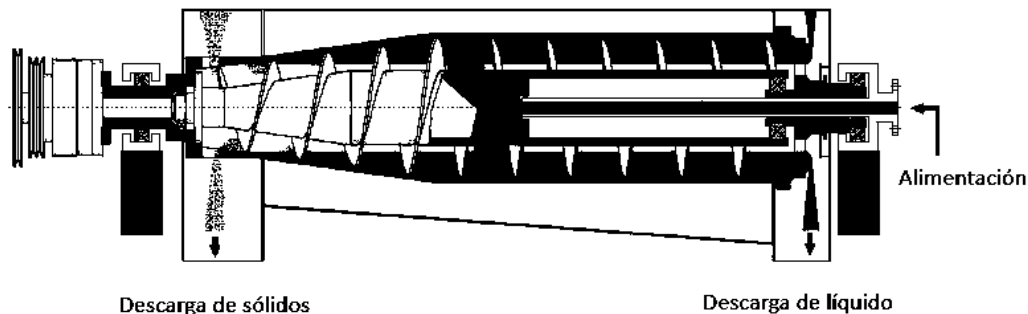


Figura 2.24 Centrífuga de tazón sólido, Tomado de la Ref. (1).

La centrífuga de tazón sólido es adecuada para una variedad de aplicaciones de deshidratación. La unidad se puede utilizar para deshidratar lodos y biosólidos sin previo acondicionamiento químico, pero la captura de sólidos y la calidad del concentrado mejoran considerablemente cuando los sólidos están acondicionados con polímeros. Los químicos para el acondicionamiento se añaden a la línea de alimentación de lodos o dentro del tazón de la centrífuga. Las tasas de dosificación para el acondicionamiento con polímeros varían de 1 a 7.5 kg/10³ kg del lodo (base de sólidos secos). Los datos del rendimiento habitual para centrífugas de tazón sólido se reportan en la siguiente tabla.



Tabla 2.31 Datos típicos del rendimiento de deshidratación de centrífugas de tazón sólido para diversos tipos de lodos y biosólidos.

Tipo de lodos	Torta de sólidos, %	Captura de sólidos, %	
		Sin químicos	Con químicos
Sin tratar			
Primario	25-35	75-90	95+
Primario y filtro percolador	20-25	60-80	95+
Primario y aire activado	12-20	65-65	92+
Purga de lodo			
Filtro percolador	10-20	60-80	92+
Aire activado	5-15	60-80	92+
Oxígeno activado	10-20	60-80	92+
Digerido anaeróbicamente			
Primario	25-35	65-80	92+
Primario y filtro percolador	18-25	60-75	90+
Primario y aire activado	15-20	50-65	90+
Digerido aeróbicamente			
Residuo activado	8-10	60-75	90+

Tomado de Metcalf&Eddy, 2003.

Algunas de las ventajas y desventajas que tienen este tipo de equipos en la deshidratación de lodos son:

Tabla 2.32 Ventajas y desventajas de las centrífugas.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • No puede ser obstruido fácilmente. • Opera de forma continua y automática. • Ahorro en los costos de transporte y eliminación de los lodos. • Se obtienen lodos con una concentración de sólidos entre el 20-25%. • No siempre necesita la adición de un polímero. • No requiere de mucho espacio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensible a cambios en las características del lodo. • Alto costo de inversión. • Alto costo en mantenimiento y operación.

Elaboración propia a partir de las referencias 5, 11, 14, 27, 30, 35.

2.4.5 Secado Térmico

En este proceso se elimina el agua de los lodos por evaporación. Para secar el lodo, suele utilizarse incineradores de pisos múltiples y secadores de hornos giratorios. Las medidas de control más importantes relacionadas con este proceso son la recogida de cenizas en suspensión y el control del olor.

El secado de lodo tiene lugar a temperaturas de aproximadamente 370°C, en tanto que para una incineración total se requieren temperaturas de 650 a 760°C. Para lograr la eliminación de olores, los gases de escape deberán alcanzar aproximadamente 730°C. Por lo tanto, si los gases

desprendidos en el proceso de secado son recalentados en un incinerador a un mínimo de 730°C, se acabara con los malos olores. Algunas de las ventajas que tiene este proceso, es que logra eliminar hasta un 90% el agua contenida en el lodo y además se obtiene una buena calidad microbiológica (desinfectado) y un producto sin olores. Una de sus principales desventajas es que requiere un alto costo energético.



Figura 2.25 Secador de tipo Rotadisc TST. Tomado de HAARSLEV INDUSTRIES.

Para obtener buenos resultados en el secado, se debe tomar en cuenta el tipo de lodo a secar y del grado de sequedad que se requiere; así como cumplir con las siguientes condiciones:

- Trabajar con un costo energético lo más bajo posible.
- No perjudicar al medio ambiente.
- Obtener un producto con un bajo contenido de humedad.
- Trabajar con la mayor seguridad.

2.4.6 Incineración

Es una ampliación natural del proceso de secado, el cual convierte el lodo en ceniza inerte, permitiendo su fácil eliminación. Las variables a considerar en este proceso son la humedad, el contenido volátil de la torta de lodo y el valor térmico del lodo.

El contenido de humedad es una variable muy importante, ya que indica si el proceso de combustión va a ser autosuficiente o si se va a requerir más combustible. Con una deshidratación adecuada (aproximadamente del 30% de sólidos), el proceso es autosuficiente sin necesidad alguna de combustible suplementario, excepto en el calentamiento inicial y control térmico.

La incineración consiste en un secado y una combustión. En este proceso cuando la temperatura del lodo alcanza los 100°C, la humedad del lodo es evaporada. El vapor de agua y la temperatura



del aire se incrementan, y la temperatura del lodo seco volátil aumenta hasta el punto de ignición. Se requiere un poco de exceso de aire para completar la combustión del lodo. Los productos terminales de la combustión son: dióxido de carbono, dióxido de azufre y cenizas.

Cuando la incineración se utilice para la reducción del volumen de basuras u otros residuos sólidos que tengan un bajo contenido de humedad, convendrá incorporar el equipo necesario para la reducción de volumen del lodo del agua residual. Si la incineración fuese a utilizarse para la reducción del volumen de lodo, será preferible incinerar el lodo sin tratar, que el digerido, dado su mayor poder calorífico.

Tabla 2.33 Características térmicas de lodos.

Lodo	Volátiles, %	Kcal/kg
Sólidos de desecho crudos	74	5550 – 7750
Digerido	70	2940
Activado	80	5000 – 5550

Tomado de Eckenfelder (1980).

Algunas de las ventajas y desventajas del proceso de incineración se muestran a continuación.

Tabla 2.34 Ventajas y desventajas del proceso de incineración de lodos.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Elimina toda el agua presente. • Reduce al 95% el volumen de lodo húmedo. • Destrucción completa de patógenos. • Destrucción y reducción a límites aceptables de compuestos orgánicos tóxicos que pueden ser dañinos para el medio ambiente. • Permite captar los metales pesados en las cenizas. • Permite recuperar energía (de un 15%). 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos costos de instalación y mantenimiento. • Requiere personal calificado. • Tratamiento extra de gases, partículas, aguas de lavado y cenizas. • Oposición social a la incineración.

Elaboración propia a partir de las referencias 5, 11, 14, 27, 30, 35, 44.

2.4.6.1 Horno de piso múltiples

Este tipo de horno es uno de los dispositivos que se usan con mayor éxito en el secado de lodo así como en la incineración.

El horno es un cilindro circular metálico con varios hogares dispuestos en plano horizontales y un eje central rotatorio con brazos de barras. La torta de lodo es alimentada por encima del hogar superior y va cayendo lentamente en trayectoria espiral hacia el centro. En los hogares superiores, ocurre la vaporización de la humedad y el enfriamiento de los gases de escape. En los hogares intermedios los gases y sólidos volátiles son quemados. El total de carbón fijado es quemado en los hogares inferiores.

El rango de temperatura es de 538°C para el hogar superior; de 870-980°C para los hogares intermedios y de 316°C en el fondo. Los gases de escape que salen por la parte superior pasan a través de un lavador de alta energía tipo Venturi, para separar las cenizas volantes arrastradas. El horno esta refrigerado por aire, que se hace circular con un ventilador; parte se recircula y otra se emite a la atmosfera controlándose la temperatura a través del ajuste del grado de reciclado o más bien, del aire purgado, ajuste que se consigue con la apertura adecuada de unas válvulas de los conductos de purga y reciclado.

Para la incineración de lodo primario sin tratar, el combustible auxiliar solo se necesitara para calentar el incinerador y para mantener la temperatura deseada cuando el contenido volátil del lodo sea bajo. Los combustibles indicados son petróleo, gas o gas sobrante del digestor.

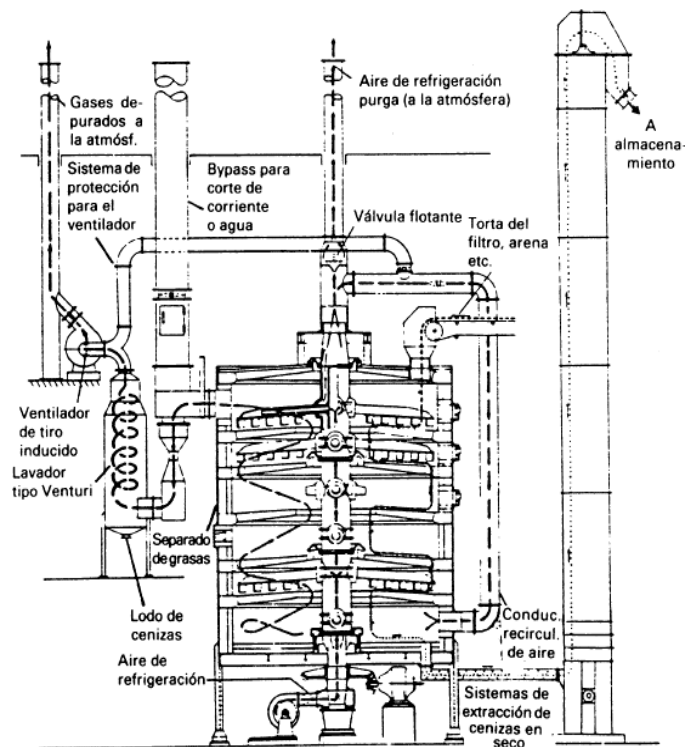


Figura 2.26 Diagrama de combustión de un horno de pisos múltiples para incineración de lodos. Tomado de Ramalho, 1991.

2.4.6.2 Hornos de Lechos Fluidizados

Este tipo de hornos desarrollan la combustión en el seno de una masa en suspensión de partículas inertes y adsorbentes, junto con cenizas y combustible, que es fluidizada por una corriente ascendente de aire de combustión. Los hornos de lecho fluidizado van a tener que trabajar con un

ciclón que dependiendo de las condiciones de fluidización tendrá que llegar a recircular material inerte. Algunas de las ventajas y desventajas de este tipo de hornos son:

Tabla 2.35 Ventajas y desventajas de los hornos de lecho fluidizado.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • La mezcla lograda mejora la reactividad y la combustión. • No necesita temperaturas muy altas (aprox. 850°C), evitando así que se fundan las cenizas. • Permite menor tiempo de residencia de los sólidos. • No requiere grandes excesos de aire. • Abarca un amplio intervalo de capacidad de tratamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Abrasión del equipo. • Necesita de un ciclón, debido a la cantidad de partículas arrastradas con la corriente gaseosa. • Pre-tratamiento del residuo para lograr fluidización (0.3-1.5 mm). • El lecho es difícil de limpiar. • Tiene altos costos energéticos por los sopladores del aire.

Elaboración propia a partir de las referencias 5, 11, 14, 27, 30, 35, 44.

El incinerador de lecho fluidizado que se utiliza comúnmente para la incineración de lodos, es vertical, con una coraza de acero refractario de forma cilíndrica que contiene un lecho de arena (medio) y orificios donde fluye el aire para que se lleve a cabo y se sostenga la combustión. (Ver Figura 2.27). Existen incineradores de lecho fluidizado de diferentes tamaños, los cuales varía en un rango de 2.7 a 7.6 m de diámetro.

El lecho de arena, cuando está estático, es de aproximadamente 0.8 m de espesor y descansa sobre un domo de ladrillo o una reja refractaria. El área que soporta el lecho de arena tiene orificios por donde se inyecta el aire a una presión de 20 a 35 kN/m² para fluidizar el lecho.

Según la velocidad de flujo de aire distinguimos dos tipos de horno: *lecho circulante* y *burbujeo*.

A bajas velocidades, aparecen burbujas de gas de combustión por el lecho fluidizado. El lecho principal de partículas suspendidas se mantiene a cierta elevación en la cámara de combustión y hierve en se lugar. Las unidades que trabajan de esta forma es a lo que se llama incineradores de "*lecho burbujeante*". La masa de sólidos suspendidos y gas, cuando se encuentra activo y a la temperatura de operación, se expande hasta el doble del volumen de cuando se encuentra en reposo.

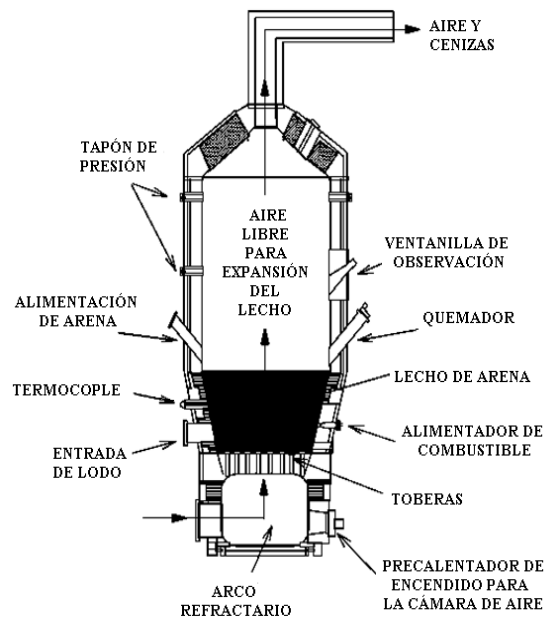


Figura 2.27 Incinerador de lecho fluidizado.

Tomado de CONAGUA, 2007.

El lodo se mezcla rápidamente a través del lecho fluidizado por la acción turbulenta del lecho. La evaporación del agua y combustión del lodo se lleva a cabo rápidamente. Los gases de combustión y las cenizas salen del lecho y son transportadas a través del área libre hacia la salida de gases que se encuentra en la parte superior del incinerador. No hay salida de cenizas por la parte inferior del incinerador. Los gases de combustión y las cenizas se lavan, generalmente, con un lavador Venturi. La temperatura mínima necesaria en el lecho de arena antes de alimentar el lodo es de aproximadamente 700°C. La temperatura de la cama de arena se controla entre los 760°C y los 820°C.

Las corrientes de recirculación consisten en agua de lavado que se produce a una tasa de aproximadamente de 25 a 40 l/kg de sólidos secos alimentados al lecho fluidizado.

La mayoría de las cenizas (99%) se capturan en el agua de lavado y la cantidad de sólidos suspendidos es de aproximadamente 20-30% de los sólidos suspendidos alimentados.

Como la DBO₅ y la DQO son insignificantes, la corriente de recirculación se manda directamente a una laguna de cenizas. Las partículas y otras emisiones a la atmósfera son similares a las generadas en los hornos de hogar múltiple.

El proceso de combustión se controla variando la tasa de alimentación de lodo y el flujo de aire al reactor para oxidar completamente la materia orgánica. Si el proceso es operado continuamente o con paros de corta duración, no hay necesidad de tener una alimentación de combustible auxiliar para el arranque.

En el incinerador con *lecho circulante*, el gas del reactor pasa a través de la cámara de combustión a una velocidad mucho mayor, de 3 a 8 m/s. A estas velocidades, las burbujas en el lecho fluidizado desaparecen y predominan las corrientes de sólidos y gases. La masa completa de partículas arrastradas fluyen hacia arriba del reactor hasta un separador de partículas, se

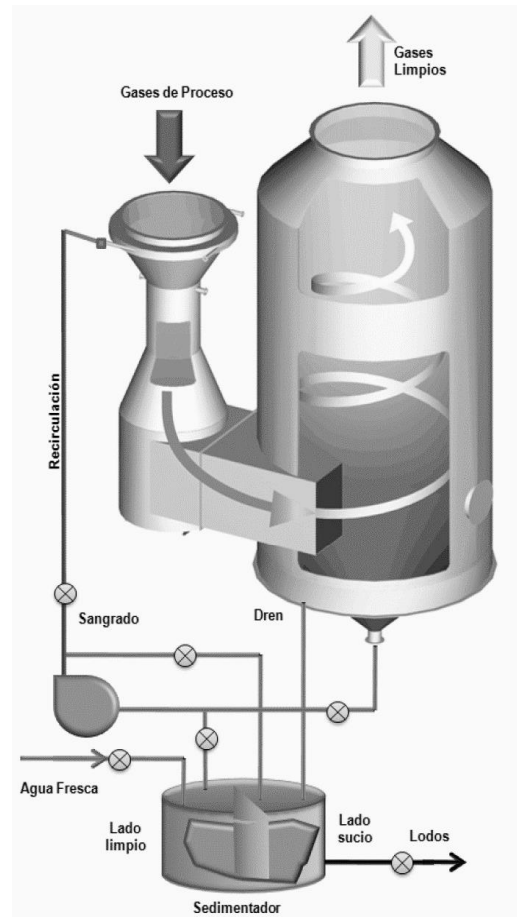


Figura 2.28 Lavador de gases tipo Venturi.
Tomado de Comercial Aralco, S.A. de C.V.



almacenan temporalmente, y se recirculan de regreso a la zona primaria de combustión en la parte baja del reactor. Continuamente se retiran cenizas de la parte baja del incinerador.

Como en el incinerador de hogar múltiple, el incinerador de lecho fluidizado, aunque es muy confiable, es muy complejo y requiere de personal entrenado para su operación. Por esta razón, los incineradores de lecho fluidizado se utilizan en plantas medianas o grandes, pero pueden ser utilizadas en plantas con rangos de flujo menores donde los terrenos para la disposición de los lodos están muy limitados.

2.4.7 Desinfección

La desinfección del lodo ha adquirido mucha importancia como proceso adicional debido a las restrictivas normas aplicables a la reutilización del lodo y a su aplicación al suelo. En la aplicación del lodo al suelo, la protección de la salud pública obliga a controlar el posible contacto con microorganismos patógenos. Como consecuencia de este hecho, se ha visto un notable incremento en la normativa de calidad de lodos para ser devueltos al ambiente así como en el monitoreo de la calidad de los lodos, tanto en su estado líquido como deshidratados.

Algunos procesos de estabilización, como la digestión anaerobia y la digestión aerobia, no desinfectan el lodo, pero permiten reducir considerablemente la presencia de microorganismos patógenos. Los métodos más adecuados para la desinfección de líquidos procedentes, tanto de la digestión aerobia como de la anaerobia, son la pasteurización y el almacenamiento a largo plazo. Cuando la composición química de los lodos no permite su reutilización en la agricultura, deberá ser dispuesto en rellenos sanitarios adecuadamente preparados para ello.

2.4.7.1 Pasteurización

Este proceso se emplea principalmente en países de Europa como Alemania y Suiza, donde la normativa establece claramente este procedimiento de desinfección de los lodos que se esparcen durante el período de crecimiento de las plantas, primavera y verano.

La pasteurización es un tratamiento de desinfección que elimina patógenos, sin embargo varios estudios han comprobado que el recrecimiento de las bacterias puede ocurrir en lodos pasteurizados. Ward et al (1999) observaron que la *Salmonella spp* crece a mayores densidades en el lodo pasteurizado que en el lodo crudo.

En el estudio realizado por Keller et al en 2004 demostró que la pasteurización y la estabilización con cal son métodos de desinfección eficientes para remover los huevos de helminto del lodo. Sin embargo, la pasteurización tiene sus ventajas y desventajas, ya que este tratamiento incrementa el problema de olor en la planta, y según Goncalves et al, 1998, este proceso solo puede ser económico si se usa el biogás producido en la planta como energía



térmica para la higienización del lodo mediante pasteurización. Varios estudios han demostrado que este proceso a 70°C y 30 minutos elimina todos los enterovirus presentes en el lodo.

Los lodos pasteurizados deben ser probados para coliformes fecales o *Salmonella spp.*, en el momento de su uso o eliminación o cuando se está preparado para la venta o distribución. Los métodos más usados para este proceso son la inyección de vapor y el intercambio indirecto de calor. Actualmente los equipos que se utilizan para la pasteurización de lodos son poco rentables debido a los altos costos de inversión.

2.4.7.2 Almacenamiento a largo plazo

Generalmente el lodo líquido se puede almacenar en lagunas excavadas en el suelo, a la espera de condiciones propicias para ser aplicado al suelo, siempre que la composición química lo permita, o en estructuras diseñadas para su secado.

El lodo almacenado en lagunas aumenta su concentración, en caso de que la evaporación sea mayor que la precipitación, o, en caso contrario este adecuadamente protegido. Los tiempos de retención en las lagunas excavadas, puede variar desde los 60 días, cuando la temperatura media es de 20°C o hasta 120 días, cuando la temperatura media es de 4°C.

Con la adecuada utilización de estos procesos se puede llegar a obtener un biosólido aprovechable, del cual su uso va a depender del tratamiento que se le decida dar a los lodos residuales; siempre manteniendo como objetivo principal la eliminación de los microorganismos patógenos que contienen estos, para que de esa forma se pueda cumplir con lo establecido por la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Tabla 2.36 Remoción de microorganismos por diferentes procesos.

Proceso	Bacterias	Virus	Parásitos (Protozoos y helmintos).
Digestión aerobia ^(a)	0.5 - 4.0	0.5 - 2.0	0.5
Digestión anaerobia ^(a)	0.5 - 4.0	0.5 - 2.0	0.5
Producción de composta ^(a)	2.0 - 4.0	2.0 - 4.0	2.0 - 4.0
Secado con aire ^(a)	0.5 - 4.0	0.5 - 2.0	0.5 - 4.0
Estabilización con cal ^(a,b)	<9.5	4.0	2

Tomado de (a) Barber, 2001, (b) Jiménez et al., 2000.

2.5 Aprovechamiento y disposición final de biosólidos.

Al proponer un sistema de tratamiento para lodos residuales, se busca que estos unas vez tratados sean aprovechados en beneficio a la sociedad y el medio ambiente. Por lo que, actualmente estos se destinan a dos fines prácticos:



- *Recuperación (reciclaje de materiales):* comprende su utilización en la agricultura, como abono orgánico, así como, la recuperación de terrenos agotados.
- *Disposición final sin ninguna intención de reciclaje o recuperación:* vertido al mar, relleno de terrenos y escombreras.

Tabla 2.37 Tasas típicas de disposición de biosólidos.

Tipo de disposición	Periodo de disposición	Tasa de disposición (Ton/Ha)	
		Intervalo	Típico
Uso agrícola	Anual	2 a 60	10
Uso forestal	Una vez o de 3 a 5 años	8 a 200	40
Recuperación de suelos	Una vez	6 a 400	100
Exclusivamente disposición final	Anual	200 a 800	300

Modificado del Metcalf&Eddy, 1991.

El aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo y clase según lo establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 (Ver Tabla 3.2). Las alternativas más usadas para estos fines son:

1) Aplicación al suelo (recuperación o uso agrícola)

Esta es una alternativa muy práctica, ya que los biosólidos proporcionan la capacidad para recuperar los nutrientes del suelo perdidos a causa del cultivo excesivo. Los biosólidos deben estar en la categoría de Clase A para poder ser aplicados en forma líquida o ser inyectados sin restricción al suelo.

La materia orgánica contenida en el lodo residual es rica en elementos como el nitrógeno, fósforo, potasio y otros nutrientes menos indispensables para el desarrollo de las plantas, como el boro, calcio, cobre, hierro, zinc, manganeso, etc.

Los biosólidos se pueden aplicar a dos tipos de suelos:

- Suelo agrícola, como son pastizales o cultivo, forestal y sitios de acondicionamiento (campos minados o de construcción), etc., también conocidos como sitios de contacto no público.
- Parques públicos, invernaderos, viveros, campos de golf, prados, jardines familiares, etc., conocidos como sitios de contacto público.

Dependiendo del requerimiento del suelo y del cultivo que se vaya a sembrar en el terreno donde se dispondrán los biosólidos serán las cantidades que se utilizaran, si lo que se quiere es sembrar pastos o vegetales (como rábanos, lechugas, espinacas, apio, etc.), se recomienda utilizar un biosólido con un alto contenido de nitrógeno, ya que este elemento estimula el desarrollo de las hojas y tallos.



Tabla 2.38 Escenarios típicos de aplicación al suelo.

Tipo de área/vegetación	Periodo	Frecuencia de aplicación	Tasa de aplicación
Terreno agrícola			
Maíz	Abril, mayo, luego de la cosecha.	Anualmente	5 a 10 ton secas/acre.
Granos pequeños	Marzo a junio, agosto y en otoño.	Hasta 3 veces por año.	2 a 5 ton secas/acre.
Semilla de soya	Abril a junio y en el otoño.	Anualmente	5 a 20 ton secas/acre.
Heno	Después de cada poda.	Hasta 3 veces por año.	2 a 5 ton secas/acre
Área de bosques	Todo el año.	Una vez cada 2 a 5 años.	5 a 100 ton secas/acre.
Terreno de pastoreo	Todo el año.	Una vez cada 1 a 2 años.	2 a 60 ton secas/acre.
Áreas de recuperación	Todo el año.	Una vez.	60 a 100 ton secas/acre.

Tomado de EPA, 2000.

Por otra parte, el fósforo es esencial en muchas etapas del desarrollo de los vegetales, debido a que este acelera su crecimiento, fortalece sus raíces y aumenta la resistencia de plagas; el potasio influye en el crecimiento de los vegetales, desarrolla las pulpas o las partes leñosas de los frutos y es necesario para la formación de la clorofila.

Algunas de las ventajas que este proceso tiene son:

- Mejora de la friabilidad y porosidad del suelo.
- Permite una mayor retención de la humedad.
- Adiciona nutrientes necesarios para las plantas.
- Incrementa la actividad biológica del suelo.
- Evita o al menos disminuye la necesidad de utilizar fertilizantes químicos.

Aunque el acondicionamiento de suelos es una opción relativamente económica y la inversión de capital es generalmente menor comparada con otros métodos de manejo de biosólidos, tiene algunas desventajas como son:

- Requiere de un extenso esfuerzo laboral, para su aplicación al suelo.
- Su aplicación se limita a ciertas épocas del año (especialmente en climas fríos).
- Oposición pública, debido a posible producción de olores.
- Requiere de un monitoreo detallado.

Aunque esta alternativa tiene muchos puntos positivos su uso también puede tener impactos negativos si los biosólidos no se aplican correctamente.



Para poder evitar estos problemas es importante seguir la normatividad, por ejemplo, en el caso de la contaminación de los acuíferos no se debe de exceder del 100% de las necesidades de nitrógeno para cada cultivo, ya que, por lo general las plantas requieren solo de un 40% de nitrógeno.

Tabla 2.39 Requerimientos de nitrógeno para varios cultivos.

Cultivo	Requerimiento de nitrógeno (kg/ha año)
Maíz	100
Avena	60
Cebada	60
Pasto	200
Sorgo	60
Soya	30

Modificado del libro blanca Jiménez, Fuente: EPA 1994.

2) Relleno sanitario

Es la forma más común de disponer los biosólidos cuando estos no pueden usarse como mejorador de suelos, por lo general, esto ocurre cuando después del análisis CRETIB se determinan como residuos peligrosos. Este proceso consiste en almacenar los residuos en el suelo, compactándolos con un tractor y cubriéndolos con tierra, para así aislarlos del ambiente, por lo regular se requiere que los lodos sean desaguados antes de su disposición con la finalidad de reducir el volumen y evitar la generación de lixiviados.



Aunque este proceso es una práctica común puede generar un problema serio, debido a su alto contenido de nitrógeno, ya que si este no es absorbido por las plantas, es fácilmente lixiviado y tiene una alta movilidad, lo que puede causar eutroficación (crecimiento desmedido de una especie desplazando otra forma de vida, perdiendo así el equilibrio ecológico) y contaminar los mantos acuíferos, además el gas que se genera dentro del relleno sanitario producto de la descomposición de la materia orgánica es otra forma de contaminar el ambiente; debido a este hecho, el relleno sanitario debe ser una de las últimas opciones en ser consideradas para la disposición de los biosólidos. Para determinar en qué sitio se dispondrá de los biosólidos se deben considerar los siguientes aspectos:

Tabla 2.40 Aspectos que deben considerarse para la selección del sitio de disposición final.

Tamaño y vida útil del sitio	Se debe definir la cantidad, las características de lodo y el método de relleno, el tiempo de vida útil debe ser mínima de 10 años.
Suelo y geología	El suelo debe de servir como material de cubierta y mezclado, debe atenuar la contaminación, controlar escurrimientos y lixiviados. Se recomienda un suelo con un bajo nivel freático (10 cm de profundidad) y textura fina (arcillosos y arenoso-arcillosos).
Propiedades químicas	Se prefieren suelos con alta capacidad de intercambio catiónico y pH>6.
Topografía	Se recomiendan suelos con una pendiente entre 1-20%, dependiendo del método de relleno. Se debe evaluar la topografía del lugar para evitar que la pendiente aumente, el potencial de erosión, el deslizamiento de tierras y las áreas sujetas a inundaciones.
Aguas superficiales	El sitio elegido debe estar lejos de corrientes superficiales y cuerpos receptores de agua.
Aguas subterráneas	Se debe realizar un estudio geohidrológico para conocer la profundidad del agua subterránea, así como su dirección, velocidad de escurrimiento, flujo y calidad.
Usos del suelo	Se deben considerar los planes de desarrollo regional para hacer una selección estratégica del sitio considerando los planes futuros.
Áreas sensibles ambientalmente	Son aquellos sitios en los que no se pueden ubicar los rellenos sanitarios. <ul style="list-style-type: none">▪ Pantanos, marismas o similares.▪ Zonas de inundación.▪ Áreas congeladas o de nieve perpetua.▪ Áreas naturales protegidas.▪ Zona de recarga de acuíferos.▪ Sitios de significado histórico y arqueológico.
Vegetación	Puede servir de barrera natural, sin embargo un exceso de esta requerirá de limpieza del terreno, lo que incrementara los costos.
Vías de acceso	Debe estar situado cerca de la planta de tratamiento y disponer de un camino de acceso durante todo el año.
Costos	Estos deben estar considerados desde la etapa inicial del proyecto (costo del terreno, la operación y transporte del lodo).

Modificado de la Ref. (3).

Tabla 2.41 Características más importantes de las áreas de rellenos.

Parámetro	Pilas	Capas	Diques
Contenido de sólidos en el lodo.	>20%	>20%	>20%
Hidrología	Acuífero superficial o profundo.	Acuífero superficial o profundo.	Acuífero superficial o profundo.
Material externo	Para acondicionar lodo >35% de ST.	0.25-1 suelo: 1 lodo.	0.25-1 suelo: 1 lodo.

Tomado de la Ref. (3).

Las ventajas que tiene el usar rellenos sanitarios son:

- Es una opción barata, cuando se cuenta con el terreno suficiente.
- No requiere pretratamiento avanzado.
- Es una operación flexible.
- Ayuda a recuperar suelos en mala calidad.

Y sus desventajas son:

- El costo incrementa cuando no hay suficiente terreno.
- No se pueden instalar en áreas muy pobladas, ya que puede haber conflictos.
- Requiere de mantenimiento aun después de cerrado.
- La producción de metano puede ser un factor de alto riesgo.
- Requiere tratar los lixiviados.

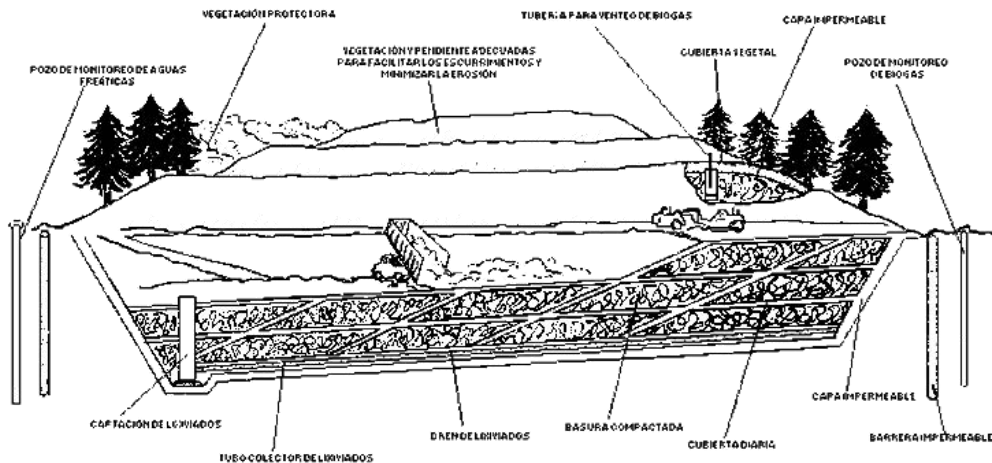


Figura 2.29 Esquema de un relleno sanitario. Tomado de http://isea.webcindario.com/index_archivos/rsu.html, (Consulta el 25 de noviembre de 2014).



CAPÍTULO 3

CASO DE ESTUDIO – “PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES “CERRO DE LA ESTRELLA”

La PTAR “Cerro de la Estrella”, como ya se mencionó anteriormente es una de las primeras plantas que se construyeron para tratar las aguas residuales de la Ciudad de México, por lo cual debido a falta de normatividad en ese tiempo no se contempló el tratamiento de los lodos producto del tratamiento de las aguas residuales. Por lo que, actualmente se requiere dar solución a este problema, debido a que los lodos residuales contienen una gran cantidad de contaminantes que son dañinos tanto para la población como para el ambiente, con este fin se pretende proponer un proceso para tratarlos y así poder cumplir con lo estipulado en la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002.

3.1 Identificación de los lodos generados en la PTAR “Cerro de la Estrella”.

En el año 2001, se realizaron muestreos de los lodos residuales de diferentes plantas del país, incluyendo la PTAR "Cerro de la Estrella", con la finalidad de conocer la calidad de los lodos residuales generados por diferentes procesos de tratamiento de agua. Estos muestreos y sus correspondientes análisis fueron realizados como parte de un proyecto en conjunto entre el Instituto de Ingeniería de la UNAM y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Los datos que se obtuvieron en este proyecto se muestran en la Tabla 3.1.

Los resultados que se obtuvieron de este análisis, muestran que el lodo generado en la planta no es corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico ni inflamable según lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, por lo que, no se consideran como residuos peligrosos. Asimismo, la cantidad de metales pesados presentes en los lodos residuales de la PTAR “Cerro de la Estrella” no sobrepasan los límites máximos permisibles establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002.

En cuanto a parásitos y patógenos que corresponden a los coliformes fecales, huevos de helminto y *Salmonella spp*; estos son los únicos parámetros que se encuentran fuera de la norma y que son los que requieren ser reducidos mediante un proceso de tratamiento,

En el caso de la *Salmonella spp* se puede observar que la concentración de este microorganismo es de 24,250 NMP/g ST, el cual es un valor muy alto comparado a las concentraciones típicas que tiene un lodo proveniente de un sistema de tratamiento de aguas residuales municipales, que van desde 100-1000 NMP/g ST (*Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction, European Commission DG Environment, 2001*). Pero se debe de considerar que el lodo proveniente de la



PTAR “Cerro de la Estrella”, es un lodo que se obtiene del tratamiento de una mezcla de aguas municipales, industriales, domésticas, etc., por lo que, se puede esperar esta concentración.

Debido a las características que presentan los lodos generados en esta planta, la mejor opción es proponer un tren de tratamiento para obtener un biosólido de clase C, ya que si se decidiera obtener un biosólido de clase A o B, los costos de inversión, mantenimiento y operación serían mayores y el proceso de tratamiento de lodos no sería tan viable debido a la cantidad de lodo que se quiere tratar.

Tabla 3.1 Características de los lodos producidos en la PTAR “Cerro de la Estrella”.

Parámetros	Unidades	NOM-004-SEMARNAT-2002	PTAR “Cerro de la Estrella”
Arsénico	mg/kg	75	0.110
Cadmio	mg/kg	85	0.064
Cromo	mg/kg	3000	1.227
Cobre	mg/kg	4300	5.010
Mercurio	mg/kg	57	0.004
Níquel	mg/kg	420	0.611
Plomo	mg/kg	840	1.687
Zinc	mg/kg	7500	9.536
Coliformes fecales	NMP/g ST	Clase A < 1,000 Clase B < 1,000 Clase C < 2,000,000	2,750,000
<i>Salmonella spp</i>	NMP/g ST	Clase A < 3 Clase B < 3 Clase C < 300	24,250
Huevos de Helminto	HH/g ST	Clase A < 1 huevo viable Clase B < 10 huevos totales Clase C < 35 huevos totales	117 huevos totales (93 viables y 24 no viables).
Sólidos Totales	%	-	1.32
Sólidos Volátiles	% de ST	-	65.81
pH	-	-	6.91
^b RAS (Base seca)	meq/kg	-	NA
^b RAS (Base húmeda)	meq/kg	-	0.400
^a Reactividad	-	-	No
^a Explosividad	-	pH ≤ 2 o ≥ 12.5	No
^a Toxicidad	-	-	No
^a Inflamabilidad	-	-	No

^a Parámetros establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005.

^b Parámetros establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (7.2.8).

Tomado del Instituto de Ingeniería (UNAM), CONACYT, 2001 (SACMEX).



3.2 Análisis técnico de las alternativas de tratamiento de los lodos.

A raíz de la investigación que se hizo de los diferentes procesos para tratar los lodos y del análisis que se realizó de esta información, tomando como base las ventajas y desventajas que tiene cada proceso, se proponen dos tipos de trenes de tratamiento de lodos (Ver Tabla 3.3 y 3.4). Para esto se consideró que el biosólido obtenido de estos trenes de tratamiento cumpla con los límites máximos permisibles establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 para biosólidos de Clase C (Ver Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Aprovechamiento de biosólidos.

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none">▪ Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación.▪ Los establecidos por la clase B y C.
Excelente o bueno	B	<ul style="list-style-type: none">▪ Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación.▪ Los establecidos para la clase C.
Excelente o bueno	C	<ul style="list-style-type: none">▪ Usos forestales.▪ Mejoramiento de suelos.▪ Usos agrícolas.

Tomado de la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Tabla 3.3 Etapas del tren de tratamiento de lodos del Proceso 1.

OPERACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Espesamiento por gravedad	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alcanza una concentración de sólidos del 4-6%. ▪ Puede tratar un volumen mayor de lodos. ▪ Facilidad de operación. ▪ Bajo costo de operación y mantenimiento. ▪ Bajo costo de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Requiere de una superficie considerable de terreno. ▪ Contribuye a la producción de malos olores.
Digestión anaerobia mesófila	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se obtiene metano como subproducto. ▪ Tiene tiempos de residencia de 15 a 20 días. ▪ Reduce la masa total del lodo. ▪ La temperatura se mantiene entre 30-38°C (Mesofílica). ▪ Produce menos olores. ▪ Ahorro en costos de energía. ▪ Eliminación de algunos microorganismos patógenos. ▪ Los biosólidos pueden usarse como acondicionador de suelos. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tiene un alto costo de inversión inicial. ▪ Produce sobrenadantes que pueden ser difíciles de tratar cuando se recirculan en la instalación. ▪ Los microorganismos que participan en el proceso son sensibles a pequeños cambios en su ambiente. ▪ No elimina altas concentraciones de huevos de helminto., pero nos permite cumplir con los parámetros establecidos para lodo de clase C. ▪ Para asegurar la máxima reducción de huevos de helminto, los lodos deben pasar por una etapa final antes de su evacuación final (secado térmico, incineración, etc.), en caso de que se pretenda obtener un lodo de clase A o B. ▪ Requiere de un personal más capacitado para su operación. ▪ Requiere de una superficie considerable de terreno.
Deshidratación por filtro banda	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ahorro de energía. ▪ Es un proceso continuo. ▪ Ahorro de floculante. ▪ Se obtiene una concentración del 25-45% de materia seca. ▪ Bajo costo de operación y mantenimiento. ▪ Ahorro en personal, debido a su facilidad de manejo. ▪ Requiere de un menor espacio para su instalación. ▪ Bajo costo de inversión. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sensible a cambios en las características del lodo. ▪ Sensible a efectos de corrosión y/o abrasión.

Elaboración propia a partir de las referencias 5, 11, 14, 27, 30, 35, 44.

Tabla 3.4 Etapas del tren de tratamiento de lodos del Proceso 2.

OPERACIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Espesamiento por gravedad	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alcanza una concentración de sólidos del 4-6%. ▪ Puede tratar un volumen mayor de lodos. ▪ Facilidad de operación. ▪ Bajo costo de operación y mantenimiento. ▪ Bajo costo de energía. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Requiere de superficies considerables. ▪ Contribuye a la producción de malos olores.
Deshidratación por filtro banda	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ahorro de energía. ▪ Es un proceso continuo. ▪ Ahorro de floculante. ▪ Se obtiene una concentración del 25-45% de materia seca. ▪ Bajo costo de operación y mantenimiento. ▪ Ahorro en personal, debido a su facilidad de manejo. ▪ Requiere de un menor espacio para su instalación. ▪ Bajo costo de inversión. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sensible a cambios en las características del lodo. ▪ Sensible a efectos de corrosión y/o abrasión.
Estabilización alcalina por post-tratamiento con cal	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduce considerablemente los niveles de microorganismos patógenos (99.9% de coliformes fecales y de 0.5 a 2 log en huevos de helminto). ▪ Es un proceso económico, siempre y cuando se utilice para plantas pequeñas (aprox. 200 l/s). ▪ Bajos costos de operación (este varía en función el tipo de lodo que se quiere obtener, ya que si se requiere un lodo con mayor calidad, este costo se incrementa). ▪ Fácil de operar. ▪ Reduce la producción de olores. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Recomendable para plantas pequeñas (aprox. 200 l/s), ya que en plantas más grandes incrementa el costo del proceso debido al consumo de cal. ▪ El volumen de los biosólidos se incrementa, lo que ocasiona mayor costo de transporte y tratamiento final. ▪ No se destruye los compuestos orgánicos que permiten un nuevo crecimiento microbiano en los lodos después del tratamiento. ▪ Durante el tratamiento se desprende un fuerte olor a amoníaco.

Elaboración propia a partir de las referencias 5, 11, 14, 27, 30, 35, 24.



Dado que el proceso para espesamiento y deshidratación del lodo es el mismo en ambos procesos, solo se hará la comparación en la etapa de estabilización de lodos, ya que es ahí donde existen discrepancias debido a las ventajas y desventajas que presenta cada uno.

Tabla 3.5 Cuadro comparativo de los procesos de estabilización para el tratamiento de los lodos de la PTAR “Cerro de la Estrella”.

Características	Proceso 1	Proceso 2
	Digestión anaerobia mesofílica	Estabilización con cal
Temperatura	30-38°C	>50°C
pH	6.6.-7.6	>12
Tiempo de retención	15-20 días	2 días (2 horas de contacto con 24 horas de maduración).
Calefacción	Si	No
Reactivo	-	CaO
Subproductos	Metano, CH ₄ Dióxido de carbono, CO ₂	Amoniaco, NH ₃
Reduce olores	Si	Si
Gasto de energía	Bajo	Bajo
Costo de inversión	Alto	Bajo o alto (Dependiendo de la cantidad de lodo a tratar).
Eliminación de microorganismos patógenos	Buena	Buena

Elaboración propia a partir de las referencias 5, 11, 14, 27, 30, 35, 24.

Como se puede observar en el tabla anterior, el proceso 1, en el cual se utiliza la digestión anaerobia mesofílica como proceso de estabilización, se trabaja con un tiempo de retención de 15 a 20 días de 30-38°C, los cuales son recomendables tanto en la literatura como en campo para obtener una buena reducción de microorganismos patógenos contenidos en los lodos residuales, asimismo se tiene una producción de metano de 65%, lo que nos genera energía suficiente para calentar los digestores y reducir la cantidad de energía eléctrica que se consume de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) mediante un sistema de cogeneración, con lo que se reducirán los costos por este servicio. Además nos permite cumplir con los parámetros establecidos para los biosólidos de clase C; resultados que se basan en reportes de laboratorios así como de plantas de tratamiento de aguas residuales que utilizan este tipo de sistema para tratar sus lodos y que actualmente se encuentran operando en el país. Su principal desventaja es el alto costo de inversión inicial.

Con respecto a la estabilización con cal (Proceso 2), se obtienen los mejores resultados en la eliminación de microorganismos patógenos en especial de los huevos de helminto según lo que se ha obtenido de pruebas en planta piloto, con lo que se cumpliría con lo establecido por la



norma para biosólidos de clase C, permitiéndonos llegar a obtener un biosólido de clase A o B, el cual depende de la cantidad de cal que se agregue. Aunque la estabilización con cal parece ser una buena opción, también tiene sus desventajas, ya que aumenta la cantidad de lodo deshidratado por la adición de cal, incrementando los costos de transporte y tratamiento final. Además considerando que el volumen de lodos a tratar de la planta es muy grande, aun para obtener biosólidos de clase C, el consumo y costo de la cal sería muy altos.

También cabe mencionar que durante el tratamiento suele haber un fuerte olor a amoníaco, lo que puede llegar a ocasionar problemas sociales y de salud con la población aledaña a la planta.

3.3 Análisis financiero de las alternativas de tratamiento de los lodos.

Los resultados del análisis técnico de las dos alternativas de tratamiento de lodos que se proponen, muestran que ambos procesos son capaces de producir un biosólido con las características requeridas, lo que los diferencia, es que el primer proceso puede tener un alto costo de inversión pero el segundo proceso a largo plazo puede tener un mayor costo de operación y mantenimiento que el requerido al inicio del proyecto. Por lo tanto para tomar una decisión de cuál es el proceso que más le conviene a la planta tanto técnicamente como económicamente, se realizó un análisis financiero a largo plazo de ambos procesos usando como criterio de selección el Valor Presente Neto (VPN).

Para cada tren de tratamiento se estimó el monto de inversión inicial, que incluye las obras civiles, el equipo, las instalaciones electromecánicas, el costo de operación y mantenimiento, etc., este último incluye los costos por insumos (reactivos) requeridos y energía eléctrica. Para este análisis se consideró un tiempo de vida útil de 20 años y una tasa de inflación del 10%. En las siguientes tablas se muestran los resultados más representativos de este análisis.

Tabla 3.6 Resultados del costo de inversión (\$ USD).

Parámetro	Digestión anaerobia mesofílica	Estabilización con cal
Obra civil	\$1,588,310.57	\$8,372.21
Equipo	\$3,066,343.64	\$720,722.75
Instalación de equipo, mecánica, eléctrica, instrumentación y puesta en marcha.	\$2,022,013.73	\$1,561,538.22
Equipo de disposición del lodo	\$20,459.80	\$20,459.80
Costo Total	\$6,697,127.73	\$2,311,092.98
Ingeniería	\$334,856.39	\$115,554.65
Costo de Inversión Total	\$7,031,984.12	\$2,426,647.63

Elaboración propia.



Tabla 3.7 Costos de reactivos y servicios (\$ USD).

Tasa de inflación.	10%
Tiempo de operación.	20 años
Costo de energía eléctrica.	\$0.067/kWh
Costo de energía eléctrica cogenerada convencional.	\$0.026/kWh
Costo de polímero catiónico.	\$3/kg
Costo de cal viva al 98% de pureza.	\$0.13/kg
Costo para disposición de lodos.	\$9.33/Ton

Elaboración propia.

Tabla 3.8 Costos de Operación (\$ USD).

Parámetro	Digestión anaerobia mesofílica	Estabilización con cal
ENERGÍA		
Consumo total de energía, kW/año.	18,563,622.60	18,609,454.92
Costo Anual	\$1,237,574.84	\$1,240,630.33
Energía de cogeneración, kW/año.	12,391,335.36	-
Costo de Energía Cogenerada.	\$322,174.72	-
Ahorro de gasto de Energía Anual.	\$503,914.30	-
Costo Real Anual	\$733,660.54	-
REACTIVOS		
Costo Anual (Polímero total deshidratación, kg/año)	\$166,516.65	\$266,424.45
Costo Anual (Consumo total de cal kg/año)	-	\$470,835.40
DISPOSICIÓN DE LODO		
Costo Anual (Lodo a disposición, Ton/año)	\$518,051.80	\$861,847.66
Costo Anual de Operación.	\$1,418,228.99	\$2,839,737.84
Costo por Ton/Lodo tratado.	\$12.33	\$17.32
Valor Presente Neto, VPN (Costo de Inversión Total)	\$19,106,166.95	\$26,602,936.66

Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla anterior, el proceso 1 tiene un VPN de \$19,106,166.95 USD (\$286,592,504.29 MXN) el cual es menor al obtenido para el proceso 2 (\$26,602,936.66 USD = \$399,044,049.94 MXN), por lo que económicamente el proceso 1 es la mejor opción para el tratamiento de lodos de la PTAR “Cerro de la Estrella”. Además cabe mencionar que el costo por tonelada de lodo a disposición mediante el proceso 1 es de \$12.33 USD (\$185 MXN) y para el proceso 2 es de \$17.33 USD (\$259.76 MXN).



3.4 Justificación del proceso de tratamiento de lodos seleccionado.

Debido a los resultados obtenidos en el análisis técnico y financiero de las dos alternativas que se proponen, se eligió el proceso 1 como tren de tratamiento. Este proceso permite obtener un biosólido de clase C, el cual cumple con los límites máximos permisibles para patógenos y parásitos establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-004-Semarnat-2002 (Ver Tabla 2.2), que permite un contenido de $< 2,000,000$ NMP/g en base seca de coliformes fecales, < 300 NMP/g en base seca de *Salmonella spp* y < 35 de huevos de helminto/g en base seca. Además la digestión anaerobia mesófila proporciona muchos beneficios, ya que durante el proceso de digestión se produce biogás con un 65% de metano, el cual permite producir la energía suficiente para abastecer al proceso en el calentamiento de los lodos cumpliendo con el requerimiento térmico del proceso y reduciendo al mismo tiempo el consumo de diesel para el calentador de agua, ya que este equipo también puede trabajar con biogás. Estos beneficios se pueden lograr a partir de la instalación de un sistema de cogeneración que permite obtener energía eléctrica y térmica, por lo que se podrá recuperar una parte del costo de inversión, ya que actualmente el consumo de energía eléctrica de la planta es muy alto, debido principalmente al funcionamiento de los sopladores que suministran aire a los reactores biológicos del proceso de tratamiento de aguas residuales.

Aunque el proceso 2 no requiere de grandes equipos, los costos de mantenimiento y operación del proceso son altos, al igual que el consumo de cal, debido a la gran cantidad de lodo que se pretende tratar, lo que no proporcionaría ningún beneficio económico a largo plazo para la planta. Estos factores se vieron reflejados en el resultado del VPN obtenido para este proceso el cual fue considerablemente mayor al del proceso 1.

Tomando en cuenta estos factores es como se llegó a la decisión de elegir el proceso 1 como tren de tratamiento para los lodos generados en la PTAR “Cerro de la Estrella”.

3.5 Descripción del proceso de tratamiento de lodos seleccionado.

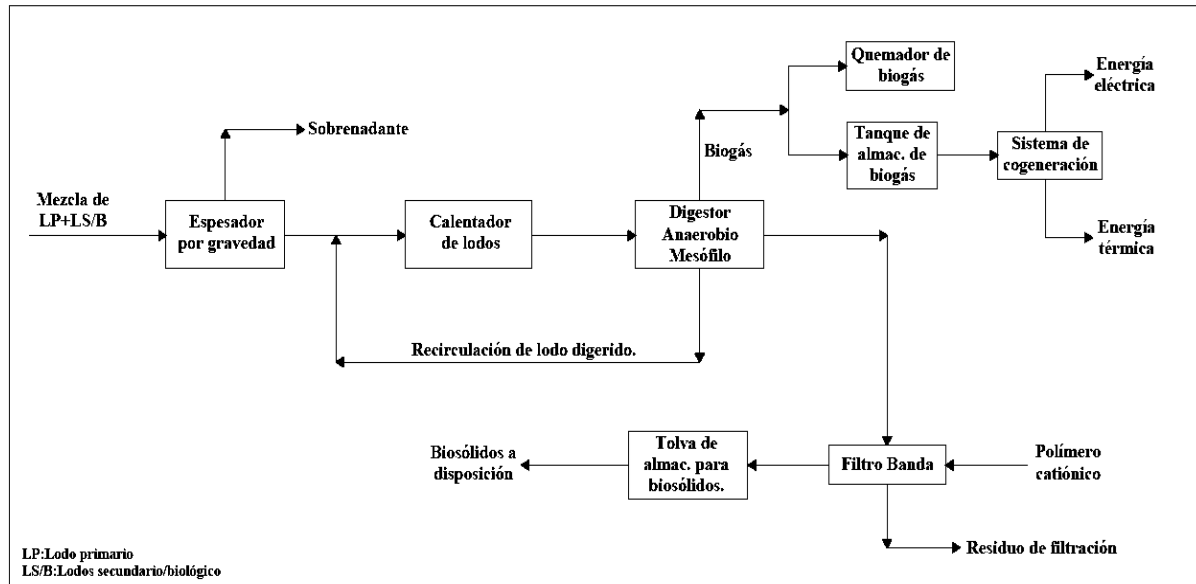


Figura 3.1 Diagrama de bloques del proceso 1. Elaboración propia.

El proceso inicia cuando los lodos procedentes de la purga del sedimentador primario y secundario con una concentración de sólidos del 4% y 1% respectivamente, son enviados mediante bombas de cavidad progresiva, a los dos espesadores por gravedad, previamente mezclados en una línea común hasta el área de espesado (línea roja en la Fig. 3.1).



Figura 3.2 Vista aérea de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Cerro de la Estrella”. Tomado de Google Earth, 2014.

Donde serán alimentados al espesador (EG-01, 02) con la finalidad de concentrar los lodos mediante sedimentación, para este fin el espesador cuenta con rastras mecánicas de tipo perimetral que le permiten agitar suavemente los lodos y así acelerar el proceso de sedimentación para obtener una concentración del 5% a la salida del espesador. El sobrenadante que resulta se extrae y se envía al influente de la planta de tratamiento. El lodo espesado se bombea a los digestores anaerobios para ser estabilizado.



Figura 3.3 Espesador por gravedad con rastras de tipo perimetral. Tomado PTAR del Country Club, Guadalajara, Jalisco. (Consulta 26 de enero de 2015).

Los lodos espesados son alimentados a los dos digestores anaerobios (TR-01, 02) mediante bombas de cavidad progresiva, en donde permanecerán durante 16 días a 37°C, en este tiempo los microorganismos que contienen los lodos llevan a cabo la transformación de los residuos orgánicos principalmente mediante tres etapas; hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis.

En la primera etapa los microorganismos degradan las moléculas orgánicas complejas como lípidos, proteínas, ácidos grasos, etc., que contiene la biomasa produciendo moléculas más simples, en esta etapa también se produce el alimento para las bacterias que actúan en las siguientes etapas y permite eliminar cualquier traza de oxígeno disuelto en el sistema: estas bacterias pueden ser anaerobias o facultativas. En la segunda etapa un grupo de bacterias anaerobias fermenta los productos de degradación de ácidos orgánicos para formar ácido acético, propiónico, butírico, etc. En este momento del proceso la mayoría de las bacterias anaerobias han extraído todo el alimento de la biomasa. En la tercera etapa los microorganismos convierten el hidrógeno y el ácido acético formado en la etapa anterior a gas metano y dióxido de carbono. Las bacterias responsables de esta transformación son estrictamente anaerobias y son llamadas metanogénicas.

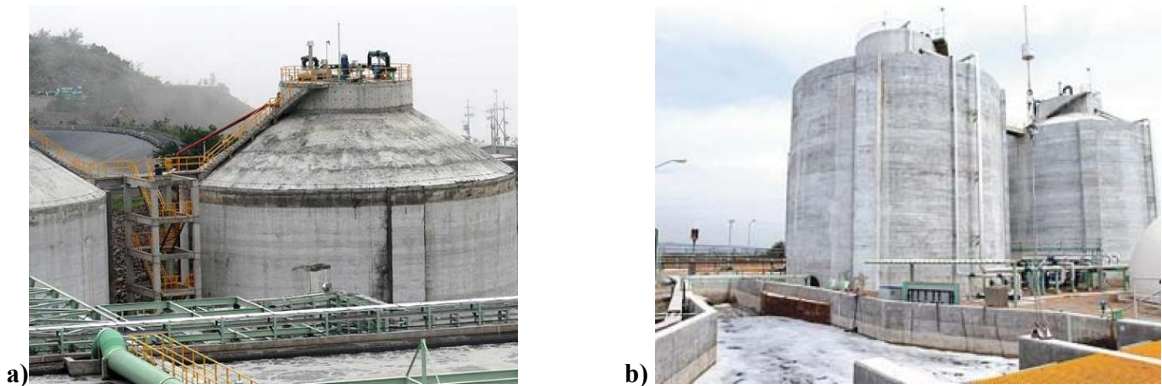


Figura 3.4 a) Vista superior del digester anaerobio mesófilo de la PTAR “Agua Prieta”, Guadalajara, Jalisco. **b)** Digestores anaerobios mesófilos de la PTAR “El ahogado”, Guadalajara, Jalisco. (Consulta 26 de enero de 2015).

Para mejorar las condiciones del lodo en el digester y acelerar las reacciones bioquímicas que se llevan a cabo, es necesario elevar la temperatura del lodo a 37°C antes de alimentarlo al digester. Así mismo cada digester tendrá un mezclador para homogeneizar la mezcla y mantener los sólidos en suspensión durante el proceso, permitiendo así la formación de biogás y de un lodo estabilizado.

Para elevar la temperatura de los lodos procedentes de los espesadores, estos se alimentaran a los dos intercambiadores de calor de espiral (EA-01, 02), donde se calentaran a contracorriente con agua a 60°C , el cual se obtiene del calentador de agua (CA-01). Para mantener la temperatura dentro de los digestores se hará recircular una parte de los lodos digeridos, los cuales se mezclarán en una línea con los lodos procedentes de los espesadores y calentaran a través de los dos intercambiadores de calor de espiral (EA-01, 02), con la finalidad de elevar su temperatura de entre $3\text{-}6^{\circ}\text{C}$, para alcanzar la temperatura máxima de 37°C , recuperando de esta forma el calor perdido en cada digester. La mezcla de lodos se alimentara por la parte lateral del domo.



Figura 3.5 Calentador de agua. Tomado de Powermaster. (Consulta 23 de enero de 2015).



Figura 3.6 Intercambiador de calor tipo espiral. Tomado de Nexson Group (Consulta 23 de enero de 2015).

El agua que sale del intercambiador de calor de espiral (54°C) y se bombea al sistema de cogeneración (SG-01) para elevar la temperatura del agua a 60°C y volver a utilizarla para el calentamiento de la mezcla de lodo que será alimentado a cada digestor (TR-01, 02).

El calentador de agua (CA-01) en un inicio operara con diesel como combustible pero una vez que el proceso se estabilice este podrá funcionar con biogás.

Una vez que termina el proceso de digestión, el biogás que se produce se acumula en la parte superior del digestor y es extraído a través de la cubierta; este es almacenado en un tanque de almacenamiento de membrana flexible (TB-01). En caso de requerirse, el biogás en exceso se enviará a un quemador (QG-01) para eliminar los gases no utilizables (Dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, etc.), evitando así su emisión directa a la atmósfera.



Figura 3.7 Tanque de almacenamiento de biogás con tapa flexible. Tomado de PTAR Padua, Italia. (Consulta 23 de enero de 2015).

Debido a que en el proceso de digestión se produce una considerable cantidad de biogás compuesto de un 65% de metano, este se pretende usarlo mediante un sistema de cogeneración (SG-01) para suministrar parte de la energía eléctrica que se consume en la planta de tratamiento así como para el calentamiento de los digestores, reduciendo y/o reemplazando de esta manera el consumo de diesel para el calentador de agua.

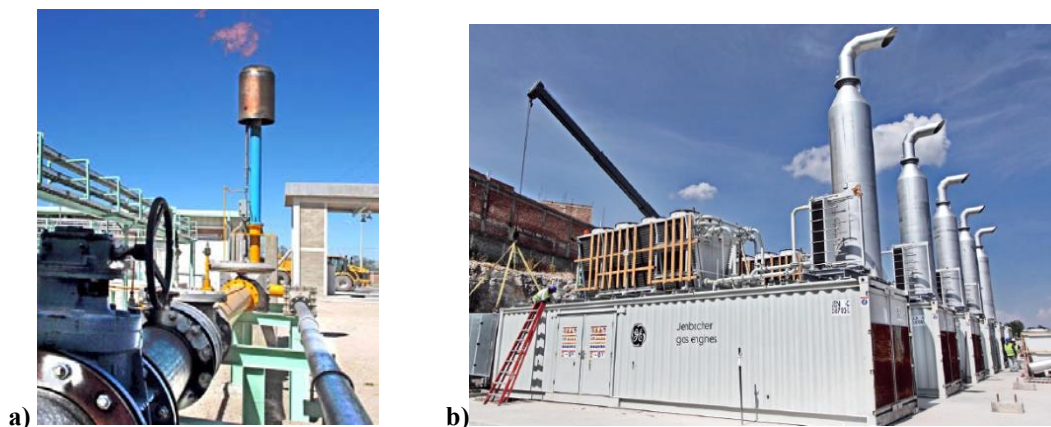


Figura 3.8 a) Quemador de biogás, **b)** Sistema de cogeneración. Tomado de PTAR “Agua Prieta”, Guadalajara, Jalisco. (Consulta 26 de enero de 2015).

El lodo estabilizado que se produce tiene un bajo contenido de materia orgánica y de microorganismos patógenos vivos. Este biosólido se acumula y espesa en el fondo del tanque y es

extraído periódicamente para ser deshidratado en la etapa siguiente del proceso de tratamiento de los lodos.

Una vez que los lodos son extraídos de los digestores anaerobios estos se envían mediante bombas de cavidad progresiva a deshidratar a los cuatro filtros banda (FL-01, 02, 03 y 04), antes de que estos ingresen a los equipos, los lodos se acondicionan en un tambor mezclador incorporado al filtro banda que gira con regulación continua de velocidad, donde estos son mezclados con una disolución de polímero catiónico al 0.2% como floculante para ayudar al proceso de deshidratación.

La suspensión ya floculada se vierte en la zona de alimentación para conseguir una distribución homogénea sobre toda la superficie de la banda. La primera etapa de la separación se realiza en la zona de pre-deshidratación donde gran parte del filtrado es drenado por gravedad a través de la banda. La filtración del lodo se inicia cuando este pasa entre los rodillos con diámetros decrecientes. La compactación y escurrido de la torta se consigue cuando las dos bandas y la torta pasan a la zona de alta presión.



Figura 3.9 Filtro banda. Tomado de ANDRITZ Separation (Consulta 23 de enero de 2015).

Para la descarga de los sólidos deshidratados se deben separar las dos bandas y colocar en cada una de ellas una cuchilla longitudinal que garantice que todo el lodo sea descargado. El filtro banda está diseñado para obtener una concentración de salida de materia seca del 20%.

A fin de evitar el ensuciamiento de la banda se realiza un lavado continuo y a presión de todo el sistema.

El lodo que se obtiene con este tren de tratamiento es un biosólido de Clase C, por lo que una vez finalizado el proceso de deshidratación, el biosólido será almacenado en tolvas (TV-01).

Los biosólidos serán transportados en camiones de volteo para su disposición final.



Figura 3.10 Tolvas para almacenamiento de biosólidos.
Tomado http://www.pramar.net/es/Web/solicitud_codigo
(Consulta 26 de enero de 2015).



Figura 3.11 Camión de volteo. Tomado de <http://www.movi-terra.com/Untitled-4.htm>
(Consulta 20 de enero de 2015).

3.6 Memoria de cálculo para el diseño del tren de tratamiento de lodos seleccionado.

3.6.1 Espesador por gravedad.

Tabla 3.9 Criterios de diseño para el espesador por gravedad.

Parámetro	Valor usado	Unidades
Flujo de diseño de aguas residuales de la PTAR.	3	m ³ /s
Coefficiente de crecimiento, YN.	0.65	kg SSV/kg DBO ₅ removido
Concentración de sólidos de un lodo primario.	4	%
Carga de DBO ₅ .	47447.1	Kg/d
Carga de sólidos suspendidos.	37698	Kg/d
^a Concentración de sólidos del lodo secundario/biológico.	1	%
^a Concentración de sólidos del lodo espesado.	5	%
Gravedad específica del lodo primario.	1.02	
Gravedad específica del lodo activado/secundario.	1.01	
^b Eficiencias de remoción para sedimentación primaria, €.		%
DBO ₅ .	27	
Sólidos suspendidos (SS).	55	
^c Eficiencias de remoción para aireación/sedimentación final (€).		%
DBO ₅ .	60	
Sólidos suspendidos (SS).	25	
^a Carga de sólidos, CS.	50	Kg/m ² /d
^b Altura del espesador.	3	m

^a Ref. Metcalf&Eddy, 2003, Tabla 14-19, Pp. 1492.
^b Ref. MOP 8, Design of Municipal Wastewater Treatment, Vol. 3, WEF 2006, Fig. 17.3.
^c Ref. Sludge Treatment and Disposal, Vol. 1, EPA 1978.



1) Cálculo de la remoción de DBO_5 del influente en el sedimentador primario.

$$\text{Remoción de } DBO_{5SP} \left(\frac{kg}{d} \right) = \text{Carga de } DBO_5 \left(\frac{kg}{d} \right) * \epsilon_{DBO_5} (\%) \quad (3.1)$$

$$\text{Remoción de } DBO_{5SP} = 47447.1 \frac{kg}{d} (0.27) = 12810.717 \frac{kg}{d} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} DBO_5 \text{ restante en las aguas residuales sedimentadas} &= \left(47447.1 \frac{kg}{d} - 12810.717 \frac{kg}{d} \right) \\ &= 34636.383 \frac{kg}{d} \quad (3.3) \end{aligned}$$

2) Cálculo de la remoción de sólidos suspendidos del influente en el sedimentador primario.

$$\text{Remoción de } SS_{SP} \left(\frac{kg}{d} \right) = \text{Carga de } SS \left(\frac{kg}{d} \right) * \epsilon_{SS} (\%) \quad (3.4)$$

$$\text{Remoción de } SS_{SP} = 37698 \frac{kg}{d} (0.55) = 20733.9 \frac{kg}{d} \quad (3.5)$$

$$SS \text{ restantes en las aguas residuales trat.} = \left(37698 \frac{kg}{d} - 20733.9 \frac{kg}{d} \right) = 16964.1 \frac{kg}{d} \quad (3.6)$$

3) Cálculo de la remoción de sólidos suspendidos volátiles y suspendidos en los lodos activados en la sedimentación final.

$$SV_{Lodos Activados} \left(\frac{kg \text{ SSV}}{d} \right) = \text{Carga de } DBO_5 \left(\frac{kg}{d} \right) * \epsilon_{DBO_5} (\%) * YN \left(\frac{kg \text{ SSV}}{kg DBO_{5removido}} \right) \quad (3.7)$$

$$SV_{Lodos Activados} = \left(47447.1 \frac{kg}{d} \right) (0.6) \left(0.65 \frac{kg \text{ SSV}}{kg DBO_{5removido}} \right) = 18504.37 \frac{kg \text{ SSV}}{d} \quad (3.8)$$

$$\text{Sólidos suspendidos} \left(\frac{kg}{d} \right) = \text{Carga de } SS \left(\frac{kg}{d} \right) * \epsilon_{SS} (\%) \quad (3.9)$$

$$\text{Sólidos suspendidos} = 37698 \frac{kg}{d} (0.25) = 9424.5 \frac{kg}{d} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} \text{Total de sólidos biológicos producidos} &= \left(18504.37 \frac{kg \text{ SSV}}{d} + 9424.5 \frac{kg}{d} \right) \\ &= 27928.87 \frac{kg}{d} \quad (3.11) \end{aligned}$$

4) Cálculo de la cantidad neta diaria de lodo residual.

$$\text{Lodo neto producido} = 20733.9 \frac{kg}{d} + 27928.87 \frac{kg}{d} = 48662.77 \frac{kg}{d} \quad (3.12)$$



$$Q_{\text{Lodo primario}} \left(\frac{m^3}{d} \right) = \frac{\text{Remoción de sólidos suspendidos}_{SP} \left(\frac{kg}{d} \right)}{\text{Gravedad específica}_{LP} * C_{LP}(\%) * 1000 \frac{kg}{m^3}} \quad (3.13)$$

$$Q_{\text{Lodo primario}} = \frac{20733.9 \frac{kg}{d}}{(1.02)(0.04) \left(1000 \frac{kg}{m^3} \right)} = 508.1840 \frac{m^3}{d} \quad (3.14)$$

$$Q_{\text{Lodo activado/secundario}} \left(\frac{m^3}{d} \right) = \frac{\text{Total de sólidos biológicos producidos} \left(\frac{kg}{d} \right)}{\text{Gravedad específica}_{LA} * C_{LA/S}(\%) * 1000 \frac{kg}{m^3}} \quad (3.15)$$

$$Q_{\text{Lodo activado/secundario}} = \frac{27928.869 \frac{kg}{d}}{(1.01)(0.01) \left(1000 \frac{kg}{m^3} \right)} = 2765.2346 \frac{m^3}{d} \quad (3.16)$$

$$Q_{\text{Total de lodo residual}} \left(\frac{m^3}{d} \right) = Q_{\text{Lodo primario}} \left(\frac{m^3}{d} \right) + Q_{\text{Lodo activado/secundario}} \left(\frac{m^3}{d} \right) \quad (3.17)$$

$$Q_{\text{Total de lodo residual}} = 508.1840 \frac{m^3}{d} + 2765.2346 \frac{m^3}{d} = 3273.4186 \frac{m^3}{d} \quad (3.18)$$

5) Cálculo del flujo volumétrico de lodo residual a la entrada del espesador por gravedad.

$$Q_{\text{Lodo a espesador}} = \frac{3273.4186 \frac{m^3}{d}}{24 \frac{h}{d}} = 136.3924 \frac{m^3}{h} \quad (3.19)$$

6) Cálculo de la concentración de sólidos en la mezcla de lodo primario + lodo activado/secundario.

$$\begin{aligned} \text{Concent. de sólidos}_{\text{Mezcla de lodo}}(\%) &= \frac{\text{Lodo neto producido} \left(\frac{kg}{d} \right)}{Q_{\text{Total de lodo residual}} \left(\frac{m^3}{d} \right) * 1000 \frac{kg}{m^3}} * 100 \\ &= 1.49 \% \quad (3.20) \end{aligned}$$

$$\text{Concent. de sólidos}_{\text{Mezcla de lodo}} = \frac{48662.77 \frac{kg}{d}}{\left(3273.4186 \frac{m^3}{d} \right) \left(1000 \frac{kg}{m^3} \right)} * 100 = 1.49 \% \quad (3.21)$$



7) Cálculo del área del espesador.

$$A_{\text{Espesador}}(m^2) = \frac{\text{Flujo másico del lodo} \left(\frac{\text{Kg de sólidos}}{d} \right)}{CS (kg/m^2/d)} \quad (3.22)$$

$$A_{\text{Espesador}} = \frac{48662.77 \frac{kg}{d}}{50 kg/m^2/d} = 973.26 m^2 \quad (3.23)$$

8) Cálculo del diámetro del espesador.

Se considera que el espesador es circular.

$$A_{\text{Círculo}} = \pi * r^2 \quad (3.24)$$

$$\text{si } D_{\text{Círculo}} = 2 * r \quad (3.25)$$

$$D_{\text{Espesador}} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(973.26 m^2)}{\pi}} = 35.20 m \quad (3.26)$$

Debido a que el diámetro máximo para espesar una mezcla de lodo primario + lodo activado es de 21 m, se utilizarán dos espesadores.

$$A_{\text{EspesadorxUnidad}} = \frac{973.26 m^2}{2} = 486.63 m^2 \quad (3.27)$$

$$D_{\text{EspesadorxUnidad}} = \sqrt{\frac{4(486.63 m^2)}{\pi}} = 24.892 m = 25 m \quad (3.28)$$

9) Cálculo del volumen del espesador por unidad, si se considera una altura, h de 3 m.

$$h_{\text{Espesador}} = \frac{V}{A} \quad (3.29)$$

Despejando V, se tiene.

$$V = A * h \quad (3.30)$$

$$V_{\text{espesadorxunidad}} = (3 m)(486.63 m^2) = 1456.89 m^3 = 1460 m^3 \quad (3.31)$$

10) Cálculo del flujo volumétrico de lodo espesado a una concentración de sólidos del 5%.

$$Q_{\text{Lodo espesado}} \left(\frac{m^3}{d} \right) = \frac{\text{Lodo neto producido} \left(\frac{kg}{d} \right)}{C_{\text{Lodo espesado}}(\%) * 1000 \frac{kg}{m^3}} \quad (3.32)$$

$$Q_{\text{Lodo espesado}} = \frac{48662.77 \frac{\text{kg}}{\text{d}}}{(0.05) \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)} = 973.26 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \quad (3.33)$$

3.6.2 Digestor anaerobio mesófilo.

Tabla 3.10 Criterios de diseño para un digestor anaerobio mesófilo.

Parámetro	Valor usado	Unidades
Flujo de lodo a digerir.	973.26	m ³ /d
Concentración de sólidos del lodo a la entrada del digestor.	5	%
Flujo másico del lodo a digerir.	48662.77	Kg SST/d
	2027.62	kg SST/h
^a Temperatura de operación del digestor.	37	°C
^b Relación de Sólidos Suspendidos Volátiles/Sólidos Suspendidos Totales, SSV/SST.	0.75	Kg SSV/kg SST
^d Porcentaje de destrucción de sólidos volátiles.	50	%
^c T(°C) x edad del lodo (d).	580	°C-d
^c Carga orgánica máxima.	0.46	lb SV/ft ³ /d
	7.7474	Kg SV/m ³ /d
^c Producción de biogás.	0.85	m ³ /kg SSV destruido
^d Requerimiento de Mezclado.	10	W/m ³
^e Relación H/D.	-	1.15

^a Ref. Metcalf&Eddy, 2003.
^b Ref. Biological Wastewater Treatment Series, Sludge Treatment and Disposal Volume 6, IWA, 2007, Table 2.3.
^c Ref. Sludge Treatment and Disposal Vol. 1, EPA 1978. Fig. 2-16, Fig. 10.16, Fig. 2-5.
^d Ref. MOP 8, Design of Municipal Wastewater Treatment, Vol. 3, WEF 2006, Fig. 10.6.
^e Ref. Biological Wastewater Treatment Series, Sludge Treatment and Disposal Vol. 6, IWA, 2007, Pp. 56.

1) Cálculo del tiempo de retención del lodo en el digestor.

$$TRH(d) = \frac{\text{Temp}(^{\circ}\text{C}) * \text{Edad de lodo (d)}}{\text{Temp. operación } (^{\circ}\text{C})} \quad (3.34)$$

$$TRH = \frac{580^{\circ}\text{C} - d}{37^{\circ}\text{C}} = 15.676 d = 16 d \quad (3.35)$$

2) Cálculo del volumen del digestor.

$$V(\text{m}^3) = TRH(d) * \text{Flujo de lodos} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right) \quad (3.36)$$

$$V_{\text{Total del digestor}} = (16 d) \left(973.26 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right) = 15572.16 \text{ m}^3 \quad (3.37)$$



$$V_{DigestorxUnidad} = \frac{V_{total\ del\ digestor}}{\#\ de\ unidades} = \frac{15572.16\ m^3}{2} = 7786.08\ m^3 \quad (3.38)$$

3) Cálculo de las dimensiones del digestor.

Considerando que el digestor es un cilindro.

$$A_{Digestor}(m^2) = \frac{V_{Unidad}(m^3)}{H(m)} \quad (3.39)$$

$$\frac{H}{D} = 1.15 \quad , \quad H = 1.15 * D \quad (3.40)$$

$$A_{Digestorxunidad}(m^2) = \frac{V_{Unidad}(m^3)}{1.15 * D(m)} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.41)$$

Despejando el diámetro, D.

$$D_{Digestorxunidad}(m) = \sqrt[3]{\frac{4V_{Unidad}(m^3)}{1.15 * \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4(7786.08\ m^3)}{1.15 * \pi}} = 20.5\ m \quad (3.42)$$

$$H = D(m) * 1.15 = 20.5 * 1.15 = 23.6\ m = 24\ m \quad (3.43)$$

$$A_{Digestorxunidad}(m^2) = \frac{\pi D^2}{4}(m^2) = \frac{\pi(20.5\ m)^2}{4} = 330.0636\ m^2 \quad (3.44)$$

$$V_{RealxUnidad}(m^3) = A_{Digestorxunidad}(m^2) * H(m) = m^3 \quad (3.45)$$

$$V_{RealxUnidad} = (330.0636\ m^2)(23.6\ m) = 7789.50\ m^3 \quad (3.46)$$

4) Verificación de la Carga Orgánica en el digestor.

$$Carga\ Orgánica\ (kg/m^3/d) = \frac{\left(\frac{SSV}{SST}\right) * Flujo\ másico\ de\ lodos\ \left(\frac{kg\ SST}{d}\right)}{2 * V_{RealxUnidad}(m^3)} \quad (3.47)$$

$$Carga\ Orgánica = \frac{\left(0.75\ \frac{kg\ SSV}{kg\ SST}\right) \left(48662.77\ \frac{kg\ SST}{d}\right)}{2(7789.50\ m^3)} = 2.343\ kg/m^3/d \quad (3.48)$$

La carga máxima orgánica para el digestor anaerobio es de 7.7474 Kg SV/m³/d, por lo que el valor que se obtuvo está por debajo de este valor.



5) Cálculo de los Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) destruidos en el digestor.

$$SSV_{Destruidos} \left(\frac{kg \text{ SSV destruidos}}{d} \right) = SSV_{Alimentados} \left(\frac{kg \text{ SSV}}{d} \right) * SSV_{Destruidos}(\%) \quad (3.49)$$

$$SSV_{Alimentados} \left(\frac{kg \text{ SSV}}{d} \right) = SST \left(\frac{kg \text{ SST}}{d} \right) * \left(0.75 \frac{kg \text{ SSV}}{kg \text{ SST}} \right) \quad (3.50)$$

$$SSV_{Alimentados} = \left(48662.77 \frac{kg \text{ SST}}{d} \right) \left(0.75 \frac{kg \text{ SSV}}{kg \text{ SST}} \right) = 36497.08 \frac{kg \text{ SSV}}{d} \quad (3.51)$$

Considerando una destrucción de Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) del 50%.

$$SSV_{Destruidos} = \left(36497.08 \frac{kg \text{ SSV}}{d} \right) (0.5) = 18248.54 \frac{kg \text{ SSV destruidos}}{d} \quad (3.52)$$

$$SST_{Lodo digerido} \left(\frac{kg \text{ SST}}{d} \right) = SST_{Alimentados} \left(\frac{kg \text{ SST}}{d} \right) - SSV_{Destruidos} \left(\frac{kg \text{ SSV dest}}{d} \right) \quad (3.53)$$

$$SST_{Lodo digerido} = \left(48662.77 \frac{kg \text{ SST}}{d} - 18248.54 \frac{kg \text{ SSV dest}}{d} \right) = 30414.23 \frac{kg \text{ SST}}{d} \quad (3.54)$$

$$Concent. \text{ de sólidos}_{Lodo Digerido}(\%) = \frac{SST_{Lodo digerido} \left(\frac{kg \text{ SST}}{d} \right)}{Q_{Lodo a digerir} \left(\frac{m^3}{d} \right) * 1000 \frac{kg}{m^3}} * 100 \quad (3.55)$$

$$Concent. \text{ de sólidos}_{Lodo Digerido} = \frac{30414.23 \frac{kg}{d}}{\left(973.26 \frac{m^3}{d} \right) \left(1000 \frac{kg}{m^3} \right)} * 100 = 3.12\% \quad (3.56)$$

La concentración de sólidos del lodo digerido es menor a la de la entrada (5 %) debido a la destrucción de los sólidos suspendidos volátiles.

6) Cálculo de la producción de biogás en el digestor.

$$Prod. \text{ de Biogás} \left(\frac{m^3}{d} \right) = SSV_{destruidos} \left(\frac{kg \text{ SSV dest.}}{d} \right) * 0.85 \left(\frac{m^3}{kg \text{ SSV dest.}} \right) \quad (3.57)$$

$$Prod. \text{ de Biogás} = 18248.54 \frac{kg \text{ SSV dest.}}{d} * 0.85 \frac{m^3}{kg \text{ SSV dest.}} = 15511.26 \frac{m^3}{d} \quad (3.58)$$



7) Cálculo de la potencia de mezclado en el digestor.

$$Potencia_{mezclado}(kW) = Req. de Mezclado \left(\frac{W}{m^3} \right) * \frac{V_{RealxUnidad} (m^3)}{1000 \left(\frac{W}{KW} \right)} \quad (3.59)$$

$$Potencia_{mezclado} = \left(10 \frac{W}{m^3} \right) \left(\frac{7789.50 m^3}{1000 \left(\frac{W}{KW} \right)} \right) = 77.895 kW \quad (3.60)$$

8) Requerimientos de calor en el digestor.

Tabla 3.11 Criterios de diseño para el cálculo del requerimiento de calor.

Parámetro	Valor usado	Unidades
^a Poder calorífico del Biogás (CH ₄ , 65%).	600	BTU/ft ³
	21188	BTU/m ³
Capacidad calorífica del agua, Cp.	1	Kcal/Kg °C
Temperatura de salida del lodo en el intercambiador de calor.	37	°C
Temperatura de entrada del lodo en el intercambiador de calor.	18	°C
Número de digestores.	2	-

^a Ref. *Sludge Treatment and Disposal Vol. 1, EPA 1978.*
^b Se asumen las temperaturas de entrada y salida del lodo.

$$Q_{TOTAL} \left(\frac{Kcal}{h} \right) = W \left(\frac{Kg}{h} \right) * Cp \left(\frac{Kcal}{kg °C} \right) * (T_2 - T_1)(°C) \quad (3.61)$$

$$Q_{TOTAL} = \left(2027.62 \frac{kg}{h} \right) \left(1 \frac{Kcal}{kg °C} \right) (37°C - 18°C) = 38524.78 \frac{Kcal}{h} \quad (3.62)$$

$$Req. de energía para cada digestor \left(\frac{Kcal}{h} \right) = \frac{Q_{TOTAL} \left(\frac{Kcal}{h} \right)}{\# de digestores} \quad (3.63)$$

$$Req. de energía para cada digestor = \frac{38524.78 \frac{Kcal}{h}}{2} = 19262.39 \frac{Kcal}{h} \quad (3.64)$$

9) Cálculo del área de la tapa y fondo del digestor.

Tabla 3.12 Dimensiones del digestor anaerobio mesófilo.

Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro	20.5	m
Altura	24	m
Radio	10.25	m
Angulo de inclinación del fondo del digestor (α).	20	°

Elaboración propia.



Considerando que la tapa y el fondo del digestor son cónicos, se tiene que:

$$A_{TAPA/FONDO} = \pi r^2 + \pi r g \quad (3.65)$$

$$\alpha = 360^\circ \left(\frac{r}{g} \right) \quad (3.66)$$

$$g = \frac{360^\circ r}{\alpha} \quad (3.67)$$

$$g = \frac{360^\circ (10.25 \text{ m})}{20^\circ} = 184.5 \text{ m} \quad (3.68)$$

$$A_{TAPA/FONDO} = (\pi)(10.25 \text{ m})^2 + (\pi)(10.25 \text{ m})(184.5 \text{ m}) = 6271.21 \text{ m}^2 \quad (3.69)$$

10) Cálculo del área de cuerpo del digestor.

Considerando que el cuerpo del digestor es un cilindro, se tiene:

$$A_{CUERPO} = 2 \pi r h = (2)(\pi) \left(\frac{20.5 \text{ m}}{2} \right) (24 \text{ m}) = 1545.66 \text{ m}^2 \quad (3.70)$$

Si se considera que el 30% del cuerpo de digestor está enterrado, se tiene:

$$A_{CUERPO ENTERRADO} = (1545.66 \text{ m}^2)(0.3) = 463.70 \text{ m}^2 \quad (3.71)$$

$$A_{CUERPO AIRE} = 1545.66 \text{ m}^2 - 463.70 \text{ m}^2 = 1081.962 \text{ m}^2 \quad (3.72)$$

$$Q_{Total Digestor} = 239521 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} = 950482.94 \frac{\text{BTU}}{\text{h}} \quad (3.73)$$

11) Cálculo de las pérdidas de calor en los digestores: tapa, fondo y cuerpo.

Si se tiene que:

$$Q = UA (T_2 - T_1) \quad (3.74)$$

Q = Pérdida de calor, Kcal/h

U = Coeficiente de transferencia de calor (Kcal /m²*h*°C)

A = Área de transferencia (m²)

T_2 = Temperatura final (°C)

T_1 = Temperatura inicial (°C)

Aplicando la Ec. 3.74, se obtienen los siguientes resultados.



Tabla 3.13 Resultados del cálculo de las pérdidas de calor en la tapa, fondo y cuerpo de los digestores.

Parámetro	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	A (m ²)	^a U (Kcal/m ² *h*°C)	Q (Kcal/h)
Tapa de concreto	15	37	6271.21	1.25	172458.28
Piso de concreto	15	37	6271.21	0.30	41389.99
Cuerpo enterrado	15	37	463.70	0.30	3060.42
Cuerpo aire	15	37	1081.962	0.95	22613.01
Pérdidas de Calor Total					239521.7

^a Ref. WEF Manual of Practices No.8, Tabla 22-13.

12) Cálculo del calor total necesario para calentar los lodos a la temperatura de operación más las pérdidas de calor.

$$\text{Calor efectivo por digestor} \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \right) = \text{Req. de energía x digestor} \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \right) + \text{Pérdidas de calor} \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \right) \quad (3.75)$$

$$\begin{aligned} \text{Calor efectivo por digestor} &= 19262.39 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} + 239521.7 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} = 258784.09 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \\ &= 1026920.992 \frac{\text{BTU}}{\text{h}} \quad (3.76) \end{aligned}$$

Considerando los 2 digestores, se tiene:

$$\text{Calor efectivo total} = 258784.09 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} (2) = 517568.18 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} = 2053841.984 \frac{\text{BTU}}{\text{h}} \quad (3.77)$$

13) Cálculo del flujo de agua requerido para calentar los lodos.

Tabla 3.14 Criterios de diseño para el intercambiador de calor.

Parámetro	Valor	Unidades
Calor efectivo total.	517568.18	Kcal/h
Capacidad calorífica del agua, Cp.	1	Kcal/Kg °C
Densidad del agua, ρ _{H2O} .	983.13	kg/m ³
^b Eficiencia del intercambiador de calor, ε	100	%
^a Temperatura de salida del agua del intercambiador de calor.	54	°C
^a Temperatura de entrada del agua del intercambiador de calor.	60	°C
Número de digestores.	2	-

^a Se asumen las temperaturas inicial y final del agua.

^b Dato dado por el proveedor.



Si se tiene que:

$$Q = W C_p (T_1 - T_2) \quad (3.78)$$

Donde:

W = Masa de agua, Kg/h

C_p = Capacidad calorífica, Kcal/Kg °C

T_2 = Temperatura final, °C

T_1 = Temperatura inicial, °C

Despejando el flujo másico de agua (W), de la ecuación anterior.

$$W_{\text{Agua}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = \frac{Q_{\text{calor efectivo total}} \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \right)}{C_{p_{\text{Agua}}} \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{kg} \cdot \text{°C}} \right) * (T_1 - T_2) \text{ °C}} \quad (3.79)$$

$$W_{\text{Agua}} = \frac{517568.18 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}}{1 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg} \cdot \text{°C}} (60 - 54) \text{ °C}} = 86261.36 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (3.80)$$

$$Q_{\text{Agua caliente}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = \frac{W_{\text{Agua}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\rho_{\text{H}_2\text{O}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = \frac{86261.36 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{983.13 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 87.74 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 24.37 \text{ lps} \quad (3.81)$$

14) Cálculo del calentador de agua.

Tabla 3.15 Criterios de diseño del calentador de agua.

Parámetro	Valor	Unidades
^a Eficiencia del calentador de agua.	98	%
Poder calorífico del diesel, C_p .	10000	Kcal/kg
Densidad del diesel, ρ_{DIESEL} .	0.865	Kg/l
^b Poder calorífico del biogás (CH ₄ , 65%).	600	BTU/ft ³
	21188	BTU/m ³
	5339.38	kcal/m ³
Densidad del biogás (CH ₄ , 65%), $\rho_{\text{BIOGÁS}}$.	1.0524	Kg/m ³

^a Dato dado por el proveedor.

^b Ref. Sludge Treatment and Disposal, Vol. 1, EPA 1978.

- Cálculo de la capacidad del calentador de agua.

$$Q_{\text{Total del calentador de agua}} \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \right) = \frac{\text{Calor efectivo total} \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \right)}{\epsilon_{\text{Calentador de agua}} (\%)} \quad (3.82)$$



$$Q_{\text{Total del calentador de agua}} = \frac{517568.18 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}}{0.98} = 528130.80 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} = 2095757.13 \frac{\text{BTU}}{\text{h}} \quad (3.83)$$

- Consumo de diesel para el calentador de agua.

$$W_{\text{Diesel}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = \frac{\text{Calor efectivo total} \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \right)}{Cp_{\text{Diesel}} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right)} \quad (3.84)$$

$$W_{\text{Diesel}} = \frac{528130.80 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}}{10000 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}}} = 52.81 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (3.85)$$

$$Q_{\text{Diesel}} \left(\frac{\text{l}}{\text{h}} \right) = \frac{W_{\text{DIESEL}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\rho_{\text{DIESEL}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{l}} \right)} \quad (3.86)$$

$$Q_{\text{Diesel}} = \frac{52.81 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{0.865 \frac{\text{kg}}{\text{l}}} = 61.06 \frac{\text{l}}{\text{h}} = 16.11 \text{ GPH} \quad (3.87)$$

- Consumo de biogás para el calentador de agua.

$$Q_{\text{Biogás}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = \frac{\text{Calor efectivo total} \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \right)}{Cp_{\text{BIOGÁS}} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \right)} \quad (3.88)$$

$$Q_{\text{Biogás}} = \frac{528130.80 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}}{5339.38 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3}} = 98.91 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 2373.90 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \quad (3.89)$$

$$W_{\text{Biogás}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = Q_{\text{BIOGÁS}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) * \rho_{\text{BIOGÁS}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \quad (3.90)$$

$$W_{\text{Biogás}} = \left(98.91 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \left(1.0524 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 104.10 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (3.91)$$

15) Cálculo de la producción de metano, CH₄, en el biogás.

Considerando un contenido de metano, CH₄, en el biogás del 65 %.



$$Prod. \text{ de } CH_4 \left(\frac{m^3 CH_4}{d} \right) = Prod. \text{ de biogás } \left(\frac{m^3}{d} \right) * Cont. \text{ de } CH_4 \text{ en el biogás } (\%) \quad (3.92)$$

$$Prod. \text{ de } CH_4 = \left(15511.26 \frac{m^3}{d} \right) (0.65) = 10082.32 \frac{m^3 CH_4}{d} \quad (3.93)$$

La producción anual de metano, CH₄, sería:

$$Prod. \text{ anual de } CH_4 = \left(10082.32 \frac{m^3 CH_4}{d} \right) \left(365 \frac{d}{año} \right) = 3,680,046.8 \frac{m^3 CH_4}{año} \quad (3.94)$$

16) Tanque de almacenamiento de biogás.

Considerando:

- Un tiempo de retención, TRH= 8 h
- Dos unidades de almacenamiento de biogás.

$$V_{Biogás} = \frac{15511.26 \text{ m}^3/d}{24 \text{ h}} = 646.30 \frac{\text{m}^3}{h} \quad (3.95)$$

$$V_{TANQUE \text{ DE ALMACENAMIENTO}} = \left(646.30 \frac{\text{m}^3}{h} \right) (8 \text{ h}) = 5170.42 \text{ m}^3 \quad (3.96)$$

$$V_{UNIDAD} = \frac{5170.42 \text{ m}^3}{2} = 2585.21 \text{ m}^3 = 2586 \text{ m}^3 \quad (3.97)$$

El tanque de almacenamiento de biogás es un cilíndrico con tapa semiesférica de membrana flexible. (Anexo II)

Las características de la tapa del tanque de almacenamiento son:

Tabla 3.16 Dimensiones de la tapa del tanque de almacenamiento de biogás.

Parámetro	Valor	Unidades
Capacidad nominal	2500	m ³
Altura de la tapa, h.	11	m
Diámetro de la tapa, Ø (D).	22	m
Presión máxima.	16	mbar

Ref. Catálogo Biogas Storage Tanks, CENO TEC. SATTLER DMGS TM.

- Volumen geométrico de la tapa semiesférica.

$$V_{Tapa \text{ semiesférica}} = \frac{\pi}{3} * h^2 * (3r - h) \quad (3.98)$$



$$\text{si, } D = 2r \quad (3.99)$$

$$\text{entonces } r = \frac{D}{2} \quad (3.100)$$

$$V_{\text{Tapa semiesférica}} = \frac{\pi}{3} * h^2 * \left(\frac{3}{2}D - h\right) = \frac{\pi}{3} * h^2 * (1.5 D - h) \quad (3.101)$$

$$V_{\text{Tapa semiesférica}} = \left(\frac{\pi}{3}\right) (11 \text{ m})^2 [1.5 (22 \text{ m}) - 11 \text{ m}] = 2787.64 \text{ m}^3 \quad (3.102)$$

- Volumen del cuerpo del tanque.

Considerando que el cuerpo del tanque es un cilindro, se tiene:

- Volumen x unidad= 2586 m³
- Diámetro de la tapa, Ø (D)= 22 m

$$V_{\text{cilindro}} = \pi r^2 h \quad (3.103)$$

Sustituyendo la Ec. 3.100 en la Ec. 3.103.

$$V_{\text{cilindro}} = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 h = \pi \left(\frac{D^2}{4}\right) h \quad (3.104)$$

Despejando la altura, h, se tiene.

$$h = \frac{4 * V_{\text{cilindro}}}{\pi * D^2} \quad (3.105)$$

$$h_{\text{calculada}} = \frac{4 (2586 \text{ m}^3)}{(\pi)(22 \text{ m})^2} = 6.80 \text{ m} \quad (3.106)$$

$$\text{Cap. total del tanque de biogás (m}^3\text{)} = \text{Cap. nominal (m}^3\text{)} + \frac{\pi * D^2(m) * h(m)}{4} \quad (3.107)$$

$$\text{Cap. total del tanque de biogás} = (2500 \text{ m}^3) + \frac{\pi(22 \text{ m})^2(11 \text{ m})}{4} = 6681.46 \text{ m}^3 \quad (3.108)$$

Las características del tanque de almacenamiento de biogás propuesto, se muestra en el Anexo II.

17) Quemador de biogás.

Tabla 3.17 Criterios de diseño para el quemador de biogás.

Parámetro	Valor	Unidades
Flujo de biogás.	15511.26	m ³ /d
	646.30	Nm ³ /h
^a Composición del biogás		
f _{CH4}	65	%
f _{CO2}	35	
Densidad std del biogás, ρ _{biogás} .	1.0524	kg/m ³
Densidad std del metano, ρ _{CH4} .	0.6770	kg/m ³

^a Ref. *Sludge Treatment and Disposal, Vol. 1, EPA 1978.*

- Selección del quemador de biogás.

Tabla 3.18 Dimensiones del quemador de biogás.

Tamaño del quemador	Capacidad Máxima	
	ft ³ /h	m ³ /h
2"	1850	52
3"	4025	114
4"	7875	223
6"	20100	569
8"	33475	948

Ref. *Catálogo The Varec Biogas 239A Series Waste Gas Burner.*

Se seleccionó el quemador con tamaño de 8", ya que este, se acerca más al flujo de biogás producido.

- Emisión de gases a la atmósfera.

Considerando una DRE (Destruction removal Efficiency)= 99%

$$W_{Biogás} \left(\frac{kg}{h} \right) = \rho_{Biogás} \left(\frac{kg}{m^3} \right) * Q_{Biogás} \left(\frac{m^3}{h} \right) \quad (3.109)$$

$$W_{Biogás} = \left(1.0524 \frac{kg}{m^3} \right) \left(646.30 \frac{m^3}{h} \right) = 680.17 \frac{kg}{h} \quad (3.110)$$

Tabla 3.19 Composición típica del biogás.

Componentes	Peso Molecular, PM	^a Concentración típica, %V	Composición, %
Metano, CH ₄	16.04	55 - 75	65
Dióxido de Carbono, CO ₂	44.01	24 - 45	31.08
Ácido sulfhídrico, H ₂ S	34.08	0.01 - 1	0.10
Nitrógeno, N ₂	28.01	2 - 6	2.92
Hidrógeno, H ₂	2.02	0.1 - 2	0.90
PM del biogás (g/gmol)	24.90		100

^a Ref. WEF Manual of Practices No.8, Vol II, Chapter 18. Stabilization. Pp. 1277.

Considerando un contenido de metano, CH₄, en el biogás del 65 %, se tiene la siguiente tabla.

$$W_{CH_4} = \left(680.17 \frac{kg}{h}\right) \left(\frac{64}{100}\right) = 442.11 \frac{kg}{h} \quad (3.111)$$

$$W_{CO_2} = \left(680.17 \frac{kg}{h}\right) \left(\frac{31.08}{100}\right) = 211.40 \frac{kg}{h} \quad (3.112)$$

$$W_{H_2S} = \left(680.17 \frac{kg}{h}\right) \left(\frac{0.10}{100}\right) = 0.68 \frac{kg}{h} \quad (3.113)$$

$$W_N = \left(680.17 \frac{kg}{h}\right) \left(\frac{2.92}{100}\right) = 19.86 \frac{kg}{h} \quad (3.114)$$

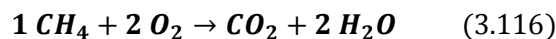
$$W_{H_2} = \left(680.17 \frac{kg}{h}\right) \left(\frac{0.90}{100}\right) = 6.12 \frac{kg}{h} \quad (3.115)$$

Tabla 3.20 Composición del biogás con un 65% de metano, CH₄.

Componentes	Peso Molecular, PM	Composición, %	Flujo másico, kg/h
Metano, CH ₄	16.04	65	442.11
Dióxido de Carbono, CO ₂	44.01	31.08	211.40
Ácido sulfhídrico, H ₂ S	34.08	0.10	0.68
Nitrógeno, N ₂	28.01	2.92	19.86
Hidrógeno, H ₂	2.02	0.90	6.12
Total	24.90	100	680.17

Elaboración propia a partir de la Tabla 3.19.

El proceso de combustión del metano, CH₄, que tiene lugar dentro del quemador de biogás, es el siguiente:





$$\begin{aligned} \text{Prod. de } CO_2 \text{ en la combustión} & \left(\frac{kg \ CO_2}{h} \right) \\ & = \text{Flujo másico del } CH_4 \left(\frac{kg}{h} \right) * \frac{DRE(\%)}{100} * \frac{PMCO_2 \left(\frac{kg}{kgmol} \right)}{PMCH_4 \left(\frac{kg}{kgmol} \right)} \end{aligned} \quad (3.117)$$

$$\begin{aligned} \text{Prod. de } CO_2 \text{ en la combustión} & = \left(442.11 \frac{kg}{h} \right) \left(\frac{99}{100} \right) \left(\frac{44.01 kg / kgmol}{16.04 kg / kgmol} \right) \\ & = 1200.92 \frac{kg \ CO_2}{h} \end{aligned} \quad (3.118)$$

$$\text{Total de } CO_2 \text{ emitido a la atmósfera} = 1200.92 \frac{kg}{h} + 211.40 \frac{kg}{h} = 1412.32 \frac{kg}{h} \quad (3.119)$$

18) Sistema de cogeneración.

Se tiene que:

- Caudal volumétrico de biogás= 646.30 Nm³/h
- Poder calorífico del Biogás (CH₄, 65%) = 5339.38 kcal/m³
- Cálculo de la producción de energía del biogás.

$$\text{Prod. de energía}_{\text{Biogás}} \left(\frac{kcal}{h} \right) = Q_{\text{Biogás}} \left(\frac{m^3}{h} \right) * Cp_{\text{Biogás}} \left(\frac{kcal}{m^3} \right) \quad (3.120)$$

$$\begin{aligned} \text{Prod. de energía}_{\text{Biogás}} & = \left(646.30 \frac{m^3}{h} \right) \left(5339.38 \frac{kcal}{m^3} \right) = 3,450,841.294 \frac{kcal}{h} = 13,693,814.66 \frac{BTU}{h} \\ & = 4010 \text{ kW} \end{aligned} \quad (3.121)$$

A partir de la producción total de biogás se seleccionó el equipo para la generación de energía (Ver Anexo II).

Sistema de cogeneración ELECTRIZ-CHP, Modelo D2000.

- Eficiencia eléctrica = 41.50 %
- Eficiencia térmica = 43.70 %

$$\text{Recuperación de energía} = (4010 \text{ kW}) \left(\frac{41.50}{100} \right) = 1664.15 \text{ kW} = 2231.63 \text{ HP} \quad (3.122)$$

$$\# \text{ de máquinas requeridas} = \frac{1664.15 \text{ kW}}{2000 \text{ kW}} = 0.8321 = 1 \quad (3.123)$$

$$\text{Recuperación de calor} = (4010 \text{ kW}) \left(\frac{43.70}{100} \right) = 1752.37 \text{ kW} = 5,979,335.28 \frac{BTU}{h} \quad (3.124)$$



El resultado obtenido en la Ec. 3.124, nos indica que el sistema de cogeneración seleccionado es capaz de proporcionar el calor requerido para el calentamiento de los digestores, ya que, el calor requerido calculado para los 2 digestores es de 517568.18 kcal/h o 2053841.984 BTU/h.

3.6.3 Deshidratación - Filtro banda

Tabla 3.21 Criterios de diseño para el filtro banda.

Parámetro	Valor	Unidades
Flujo másico de lodos a deshidratar, W_{Lodo} .	30414.23	kg SST/d
Concentración de sólidos del lodo digerido.	3.12	%
Concentración de sólidos del lodo deshidratado.	20	%
Ciclo de operación.		
Días de trabajo, D_T .	5	d/semana
Horas de trabajo, H_T .	8	h/d
Caudal de lavado, C_L .	1.7	l/m*s
Concentración de la disolución de polímero.	0.2	%
Ancho de banda máximo en el mercado.	3	m
^a Carga másica, C_m .	320	Kg SST/h/m
^a Carga hidráulica, C_h .	170	l/min/m
^a Dosificación de polímero seco, D_p .	5	g/kg sólido seco

^a Ref. MOP 8, *Design of Municipal Wastewater Treatment, Vol. 3.*

1) Cálculo del flujo volumétrico de lodo a deshidratar.

$$Q_{deshidratar} \left(\frac{m^3}{d} \right) = \frac{W_{Lodo} \left(\frac{kg}{d} \right)}{C_{inicial} \left(1000 \frac{kg}{m^3} \right)} \quad (3.125)$$

$$Q_{deshidratar} = \frac{30414.23 \frac{kg}{d}}{(0.0312) \left(1000 \frac{kg}{m^3} \right)} = 973.26 \frac{m^3}{d} = 675.88 \frac{l}{min} \quad (3.126)$$

2) Cálculo de las horas de funcionamiento semanal, H_F .

$$H_F \left(\frac{h}{sem} \right) = D_T \left(\frac{d}{sem} \right) * H_T \left(\frac{h}{d} \right) \quad (3.127)$$

$$H_F = \left(5 \frac{d}{sem} \right) \left(8 \frac{h}{d} \right) = 40 \frac{h}{sem} \quad (3.128)$$

3) Cálculo de la carga horaria de lodo, C_F .

$$C_F \left(\frac{kg}{h} \right) = \frac{\text{Flujo másico de lodo} \left(\frac{kg}{d} \right) * D_T \left(\frac{d}{sem} \right)}{H_F \left(\frac{h}{sem} \right)} \quad (3.129)$$

$$C_F = \frac{\left(30414.23 \frac{kg}{d} \right) \left(5 \frac{d}{sem} \right)}{40 \frac{h}{sem}} = 3801.78 \frac{kg}{h} \quad (3.130)$$

4) Cálculo del ancho de banda, W .

El ancho de banda del filtro se puede calcular a partir de la carga másica (C_m) y de la carga hidráulica (C_h), por lo que, se seleccionara el ancho de banda mayor.

$$C_m (kg/h/m) = \frac{C_F \left(\frac{kg}{h} \right)}{W_{Banda} (m)} \quad (3.131)$$

O bien.

$$C_h (l/min/m) = \frac{Q_{deshidratador} \left(\frac{l}{min} \right)}{W_{Banda} (m)} \quad (3.132)$$

Despejando W de ambas ecuaciones, se tiene.

$$W_{Banda} (m) = \frac{C_F \left(\frac{kg}{h} \right)}{C_m (kg/h/m)}, y \quad (3.133)$$

$$W_{Banda} (m) = \frac{Q_{deshidratador} \left(\frac{l}{min} \right)}{C_h (l/min/m)} \quad (3.134)$$

Sustituyendo los valores, se tiene.

$$W_{Banda} = \frac{3801.78 \frac{kg}{h}}{(320 kg/h/m)} = \mathbf{11.88 m} \quad (3.135)$$

$$W_{Banda} = \frac{Q_{deshidratador} \left(\frac{l}{min} \right)}{C_h (l/min/m)} = \frac{675.88 \frac{l}{min}}{(170 l/min/m)} = 3.98 m \quad (3.136)$$



Dado que el ancho de banda calculado a partir de la carga másica es mayor, se selecciona este valor que corresponde a 11.88 m, con el que se determinara el número de filtros banda que se requieren para deshidratar el lodo.

$$\# \text{ de filtros banda} = \frac{W (m)}{3 m} = \frac{11.88 m}{3 m} = 3.96 \quad (3.137)$$

Se requieren 4 filtros banda de 3 m de ancho de banda cada uno.

5) Cálculo del flujo de agua de lavado, Q_L , para cada filtro banda.

$$Q_{L \text{ Filtro banda} \times \text{Unidad}} \left(\frac{l}{s} \right) = C_L \left(\frac{l}{m s} \right) * W(m) = \left(1.7 \frac{l}{m s} \right) (3 m) = 5.1 \frac{l}{s} \quad (3.138)$$

$$Q_{L \text{ Filtro banda} \times \text{Unidad}} = \left(1.7 \frac{l}{m s} \right) (3 m) = 5.1 \frac{l}{s} \quad (3.139)$$

$$Q_{L \text{ TOTAL}} = \left(5.1 \frac{l}{s} \right) (4) = 20.4 \frac{l}{s} \quad (3.140)$$

6) Dosificación de polímero, D_P .

$$\text{Consumo}_{\text{Polímero} \times \text{filtro banda}} \left(\frac{kg}{d} \right) = \frac{W_{\text{Lodo}} \left(\frac{kg}{d} \right) * D_P \left(\frac{g \text{ polímero}}{kg \text{ sólidos secos}} \right)}{(1000 g)} \quad (3.141)$$

$$\text{Consumo}_{\text{Polímero} \times \text{filtro banda}} = \frac{\left(30414.23 \frac{kg}{d} \right) \left(5 \frac{g \text{ polímero}}{kg \text{ sólidos secos}} \right)}{1000 g} = 152.07 \frac{kg}{d} \quad (3.142)$$

7) Cálculo del flujo diario de disolución de polímero.

$$Q_{\text{Polímero} \times \text{filtro banda}} \left(\frac{m^3}{d} \right) = \frac{\text{Consumo}_{\text{Polímero} \times \text{filtro banda}} \left(\frac{kg}{d} \right)}{(C_{\text{Disolución de polímero}}) \left(1000 \frac{kg}{m^3} \right)} \quad (3.143)$$

$$Q_{\text{Polímero} \times \text{filtro banda}} = \frac{152.07 \frac{kg}{d}}{(2 \times 10^{-3}) \left(1000 \frac{kg}{m^3} \right)} = 76.04 \frac{m^3}{d} \quad (3.144)$$

8) Flujo volumétrico de lodo deshidratado.

$$Q_{\text{deshidratado}} \left(\frac{m^3}{d} \right) = \frac{W_{\text{Lodo}} \left(\frac{kg}{d} \right)}{C_{\text{final}} \left(1000 \frac{kg}{m^3} \right)} \quad (3.145)$$



$$Q_{deshidratado} = \frac{\text{Flujo másico de lodo} \left(\frac{kg}{d} \right)}{C_{final} \left(1000 \frac{kg}{m^3} \right)} = \frac{30414.23 \frac{kg}{d}}{(0.2) \left(1000 \frac{kg}{m^3} \right)} = 152.07 \frac{m^3}{d} \quad (3.146)$$

3.6.4 Tolva de almacenamiento para biosólidos.

- Considerando un tiempo de retención, TRH = 28 h
- Flujo volumétrico de lodo deshidratado = $152.07 \text{ m}^3/\text{d} = 6.34 \text{ m}^3/\text{h}$
- Número de tolvas = 4 (Se requiere una tolva por cada filtro banda)

$$V_{TOLVA} = Q_{Lodo\ deshidratado} \left(\frac{m^3}{h} \right) * THR (h) \quad (3.147)$$

$$V_{TOLVA} = \left(6.34 \frac{m^3}{h} \right) (28 h) = 177.52 m^3 \quad (3.148)$$

$$V_{Por\ Unidad} = \frac{177.52 m^3}{4} = 44.38 m^3 \quad (3.149)$$

Las características de cada equipo se presentan el Anexo II.

3.7 Recomendaciones para el aprovechamiento de los lodos tratados.

Dado que el tipo de biosólido obtenido mediante el tratamiento que se propone, es de Clase C, según lo establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, estos son susceptibles principalmente para uso forestal, agrícola y como mejorador de suelos.

Aunque en México aún no se tiene mucha experiencia en este tema, son varias las plantas de tratamiento de aguas residuales en el país (Chihuahua, Nuevo León, Tamaulipas, Aguascalientes, etc.) que utilizan los biosólidos obtenidos en sus procesos como fertilizantes para las zonas de cultivo aledañas a las plantas, con lo que se han obtenidos resultados satisfactorios, ya que, les ha permitido recuperar los suelos infértiles así como incrementar la producción y mejorar la calidad de los cultivos.

Debido a estas razones, la finalidad de los biosólidos que se van a generar del proceso que se propone, es que estos puedan ser usados como acondicionador de suelos para ser reutilizados en la agricultura o en la recuperación de áreas que así lo requieran, sujetándose a lo establecido en la Ley Federal de Sanidad Vegetal y conforme a la normatividad vigente en la materia.



CONCLUSIÓN

A raíz de los objetivos planteados al inicio de este proyecto de tesis, se puede concluir que gracias a la información proporcionada por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), sobre las características físicas, químicas y biológicas de los lodos de la PTAR “Cerro de la Estrella”, se pudo identificar el tipo de lodo que se genera del tratamiento de las aguas residuales, el cual no es considerado como un residuo peligroso de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005 y la NOM-004-SEMARNAT-2002; esto con la finalidad de poder proponer el tren de tratamiento de lodos más óptimo.

El proceso seleccionado para tratar la mezcla de lodo primario y secundario que se genera en la planta y cuya principal característica es la estabilización de los lodos mediante la digestión anaerobia mesófila, se eligió a partir de un análisis técnico y financiero de dos alternativas que eran las más indicadas para tratar el tipo de lodo de la planta, de acuerdo al análisis que se hizo de la investigación de los diferentes procesos de tratamiento de lodos (Capítulo 2). Con el análisis técnico se concluyó que el proceso 1 tenía mayores ventajas a largo plazo debido a la producción de biogás (generación de energía eléctrica y térmica por cogeneración), lo que permitirá reducir los costos por energía eléctrica que consume la planta, permitiéndole usar ese ahorro, para otros fines, como por ejemplo en el mantenimiento de los equipos o en la infraestructura de la esta. Además en el costo de inversión obtenido en el análisis financiero de ambos procesos, se obtuvo que para el proceso seleccionado este factor fue menor al del proceso 2, lo que permitió seleccionar en definitiva este tren de tratamiento.

El proceso que se propone permite obtener un biosólido de Clase C, con lo que se estaría cumpliendo con lo establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Asimismo, esta norma también establece que se deben de realizar muestreos y análisis correspondientes para demostrar su cumplimiento, por medio de laboratorios acreditados, y se deberán conservar los registros de por lo menos de 5 años posteriores a su realización. La frecuencia del muestreo y análisis para los biosólidos se realizará en función del volumen de biosólidos generados (155 Ton/d) como se establece en la tabla 4 de la norma, para este caso será de una vez por trimestre para metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos.

También cabe mencionar que en caso de que el tren de tratamiento no llegara a cumplir con lo establecido en dicha norma, sobre todo en cuanto a contenido de huevos de helminto se recomienda incluir algún proceso de secado térmico o al ambiente, adición de cal o en últimas instancias la incineración.



El hecho de tratar los lodos de la planta no solo permitirá solucionar este problema sino que traerá consigo varios beneficios, ya que, el biosólido obtenido debido a sus características podrá ser usado como acondicionador de suelos para ser reutilizados en la agricultura o en la recuperación de áreas que así lo requieran. Esto se sujetará a lo establecido en la Ley Federal de Sanidad Vegetal y conforme a la normatividad vigente en la materia.

En un futuro podría considerarse el enviar los biosólidos a otros estados del país en los que se necesite recuperar suelos que se han visto afectados por la sobreexplotación de actividades agrícolas, ganaderas, mineras, etc., así como a los cambios climáticos que sufre el planeta; la deforestación, la urbanización, etc., y que no cuenten con plantas de tratamiento de aguas residuales cercanas, que les puedan proporcionar este biosólido.

Aunque no se tiene un dato específico de cuántos lodos residuales se generan en el país y cuántos de estos son tratados, se ha buscado contrarrestar este problema, solicitando que las plantas de tratamiento de aguas residuales que se encuentran en operación y aquellas que se pretenden construir cuenten con el sistema más óptimo para tratar estos residuos, de acuerdo a la normatividad vigente (NOM-004-SEMARNAT-2002), ya que, muchos de los lodos residuales son desechados al drenaje sin ningún tipo de tratamiento, lo que ocasiona problemas de salud pública y daños al medio ambiente.



REFERENCIAS

1. Barrios, J. A. (2009). *Aspectos generales del manejo de lodos*, Instituto de Ingeniería, de <http://academiadeingenieriademexico.mx/archivos/talleres/aprovechamiento-lodos/Aspectos%20Generales%20del%20Manejo%20de%20Lodos.pdf>, [Consultado el 03 de febrero de 2014].
2. Biological Wastewater Treatment Series: *Sludge Treatment and Disposal*, Vol. 6, IWA, 2007.
3. Callejas, P.A. (2008). “*Estudio del compostaje aeróbico como alternativa para la estabilización de lodos procedentes de una planta de tratamiento de aguas servidas de la región del Bío Bío*”, Tesis de maestría en Ciencias de Recursos Naturales, Universidad de la Frontera, Facultad de Ingeniería, Ciencias y Administración, Chile, Pp. 8-9.
4. Camperos, R. E., Vigueros, C. A., Chávez, M. G., Estrada, E. V., *Criterios para el diseño de rellenos de lodos generados en plantas de tratamiento municipales*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicon/R-0146.pdf>. [Consultado 10 de noviembre de 2014].
5. Cardoso, V.L., González, R.A., *Identificación de sistemas de tratamiento de lodos residuales*. Serie autodidáctica de medición de la calidad del agua, segunda parte: Comisión Nacional del Agua, CONAGUA, Pp. 12-33.
6. Castell, X.E. (2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos*, Madrid: Editorial Díaz de Santos, S.A., Pp. 192-194.
7. Castro, L.P. (2001). *Remoción de parásitos (huevos de helminto) y patógenos (coliformes fecales) por digestión anaerobia de lodos en mesofilia y termofilia*. Tesis de licenciatura de Biología, Facultad de Ciencias, UNAM. Pp. 34-37.
8. Comisión Estatal del agua, CEA (2012). *Planta de tratamiento de aguas residuales “El Ahogado”*, segunda edición, Guadalajara, Jalisco.
9. Comisión Estatal del agua, CEA (2013). *Planta de tratamiento de aguas residuales “Agua Prieta”*, primera edición, Guadalajara, Jalisco.
10. Comisión Nacional del Agua, CONAGUA (2009). *Estadísticas del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México*. D.F., Pp. 105-107.
11. Comisión Nacional del Agua, CONAGUA (2007). *Guía para el manejo, tratamiento y disposición de lodos residuales de plantas de tratamiento municipales*, México, D.F., Pp. 75-131.
12. Comisión Nacional del Agua, CONAGUA (2007). *Guía para el manejo, estabilización y disposición de lodos químicos*, México, D.F., Pp. 27-57.



13. Comisión Nacional del Agua, CONAGUA (2011). *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación*, México, D.F., Pp. 163-165.
14. Comisión Nacional del Agua, CONAGUA (2007). *Sistemas alternativos de tratamiento de aguas residuales y lodos producidos*, México, D.F., Pp. 95-116.
15. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Secretaria de Obras y Servicios. *Manual de Operación Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Cerro de la Estrella*, México, D.F. Tomos I y II.
16. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. Subdirección de Ingeniería Hidráulica (1993). *Manejo y disposición de lodos generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Cerro de la Estrella*, México, D.F., Vol. 1.
17. Environmental Protection Agency (1978). *Sludge Treatment and Disposal*, Vol. 1, Cincinnati, Ohio.
18. Environmental Protection Agency (1999). *Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge*, Washington, D.C., U.S.A.
19. Environmental Protection Agency (2000). *Land Application of Biosolids*, Washington, D.C., U.S.A.
20. García, O. O. (2011). “*Propuesta de ingeniería básica para el tratamiento de los lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de la central termoeléctrica Valle de México*”, Tesis de maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, Instituto Politécnico Nacional, México, Pp. 31-40.
21. Gray, N.F. (2004). *Biology of wastewater treatment*, 2nd edition, London: Imperial College Press. Pp. 673.
22. Hermosilla, C.A. (2005). *Evaluación económica de una planta de compostaje en la viii región de Chile*, Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola, Departamento de Agroindustrias, Chile, Pp. 17-22.
23. Hernández, M. A. (1998). *Depuración de aguas residuales*, cuarta edición, España: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Pp. 719.
24. Jiménez, B. (2007). Helminth ova control in sludge: a review. En *Water Science and Technology*, 56 (9), Pp. 147-155.
25. Jiménez, B., Barrios, J. A., Maya, C. (2000), Class B biosolids production from wastewater sludge with high pathogenic content generated in an advanced primary treatment. En *Water Science and Technology*, 42 (9), Pp. 103-110.
26. Jiménez, C. B. (2001). *La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada*, México, Limusa, Pp. 284-304.
27. Lasheras, A. M. (2013). Tratamiento de fangos, técnicas de espesamiento y estabilización, de <http://catedramln.unizar.es/files/conferencias/lodos2013/LAsheras.pdf>, [Consultado el 21 de octubre de 2014].



28. Lomelí, E.A. (2011). *Tratamiento de aguas residuales provenientes de rastro mediante un sistema de reactores anaerobio y aerobio con aireación intermitente*. Tesis de maestría en Ingeniería. Facultad de Ingeniería, UNAM. Pp. 5-10.
29. López, G. A. (2011). “*Efecto de la adición de micronutrientes en la producción de biogás del proceso de digestión anaerobia termofílica de lodos residuales*”, Tesis de licenciatura en Ingeniería Agroquímica, Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas, Orizaba, Veracruz.
30. Marcel Dekker, Inc. (1996). *Biosolids Treatment and Management, Processes for Beneficial Use*, New York, Girovich, J. M. (Ed.), Pp. 140-150.
31. Martínez, E.V. (2009). *Pretratamiento térmico y digestión anaerobia mesofílica de lodos residuales para la producción de biosólidos de clase A*. Tesis de maestría en Ingeniería. Instituto de Ingeniería, UNAM. Pp. 4-19.
32. Mendoza, V.M., Sánchez, V.J. (2012). *Evaluación físico-química y microbiológica de cuatro niveles de lodos primarios ordinarios en la elaboración de compost*, Universidad de el Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, Pp. 3-13.
33. Metcalf & Eddy (1977). *Tratamiento y depuración de las aguas residuales*, España, Editorial Labor S.A., Pp. 408.
34. Metcalf & Eddy. (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*, 3rd edition, New York, McGraw-Hill, Pp. 773, 805-888.
35. Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*, 4th edition, Boston: McGraw-Hill, Pp. 1456-1520.
36. Mondragón, G.J. (2001). *Análisis microbiológico en el tratamiento de aguas residuales por lodos activados*. Tesis de licenciatura de Química Farmacéutica Bióloga, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza de Cuautitlán, UNAM. Pp. 2-14.
37. Monsalve, M., Delgado, L.E., Giraldo, E., *Modelación del compostaje de biosólidos en pila estática aireada*, Centro de Investigaciones en Ingeniería Civil y Ambiental (CIIA), Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Pp. 2.
38. Negroni, M. (2009). *Microbiología Estomatológica, Fundamentos y guía práctica*, 2da edición, Buenos Aires, Argentina: Editorial Médica Panamericana, Pp. 47-48.
39. Norma Oficial Mexicana (NOM-003-SEMARNAT-1997). *Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicio al público*. Publicado en el Diario Oficial de la Federación, 21 de Septiembre de 1998.
40. Norma Oficial Mexicana (NOM-004-SEMARNAT-2002). *Protección Ambiental - lodos y biosólidos - Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*. Publicado en el Diario Oficial de la Federación, 15 de Agosto de 2003.



41. Ojeda, L.C. (2000). *Procesos aerobios de tratamiento biológico, utilizados en el tratamiento de aguas residuales*. Tesis de licenciatura en Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM. Pp. 24-32.
42. Oropeza, G.N. (2006). *Lodos residuales: estabilización y manejo*, Departamento de Ingeniería, Universidad de Quintana Roo, Chetumal, Q. Roo, México, Pp. 61-66.
43. Pérez, F.J., Mallebrera, U.M., *Abastecimiento de aguas, Tratamiento de fangos*, Universidad Politécnica de Cartagena, Pp. 18-41.
44. Ramalho, R.S. (1990). *Tratamiento de Aguas Residuales*, Barcelona: Editorial Reverté, S.A., Pp. 531-584.
45. Rodríguez, R. y Cía. (2008). Gestión y tratamiento de residuos sólidos urbanos, de http://www.creaf.uab.es/propies/pilar/LibroRiesgos/09_Cap%C3%ADtulo8.pdf, [Consultado el 20 de diciembre de 2014].
46. Rodríguez, B.D. (2011). *Estación depuradora de aguas residuales y planta de compostaje de ASPE*, Instituto Universitario del Agua y de las Ciencias Ambientales, España, Pp. 10-11.
47. Rojas, R. (2002). *Sistema de tratamiento de aguas residuales*, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Pp. 12-15.
48. Salgado, V.G. (1998). *Remoción de huevos de helminto en agua residual por cinco tecnologías diferentes sobre el sistema de tratamiento primario avanzado (TPA)*. Tesis de licenciatura de Ingeniería Química. Instituto Tecnológico de Orizaba, Veracruz. Pp. 16-23.
49. Sanz, A.J., Guerrero, G., Ortega, J.M., *Tratamiento de fangos de aguas residuales urbanas por oxidación húmeda: proceso ATHOS*, VEOLIA Water Systems Ibérica, Pp. 269-271.
50. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT (2001). *Guía para la gestión integral de los residuos sólidos municipales*. México, D.F., Pp. 66-67.
51. Suárez, J., Jácome, A. (2007). *Espesamiento de fangos de estaciones depuradoras de aguas residuales*, Universidade da Coruña, España, Pp. 10-28.
52. Tello, Pilar. *Comparación entre diversos procesos de secado de lodos, Ventajas y Desventajas*, Asociación Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Pp. 11, de aidis.org.br/encontros_tecn/5_encontro/apresentacoes/pilar_telo.pdf, [Consultado el 29 de septiembre de 2014].
53. Vera, S.L. (2011). *Comparación entre dos tecnologías distintas de espesamiento de fangos en una E.D.A.R.U.*, Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, Pp. 7-10.
54. WEF (2006). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants: Manual of Practice No. 8 (MOP 8)*, Vol. 3.

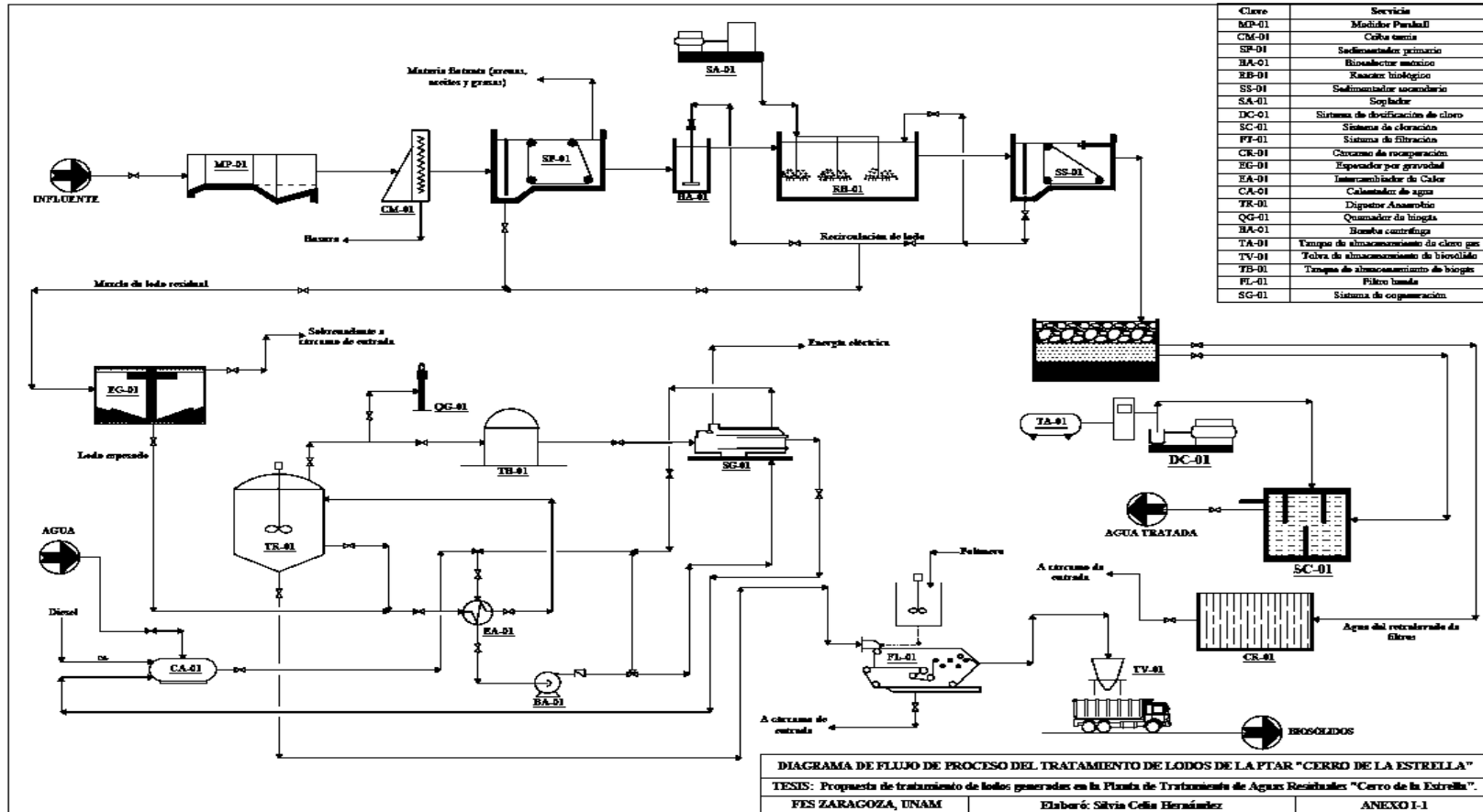


PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE LODOS GENERADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES “CERRO DE LA ESTRELLA”



ANEXO I – PLANOS

I-1 Diagrama de flujo de proceso del proceso seleccionado.

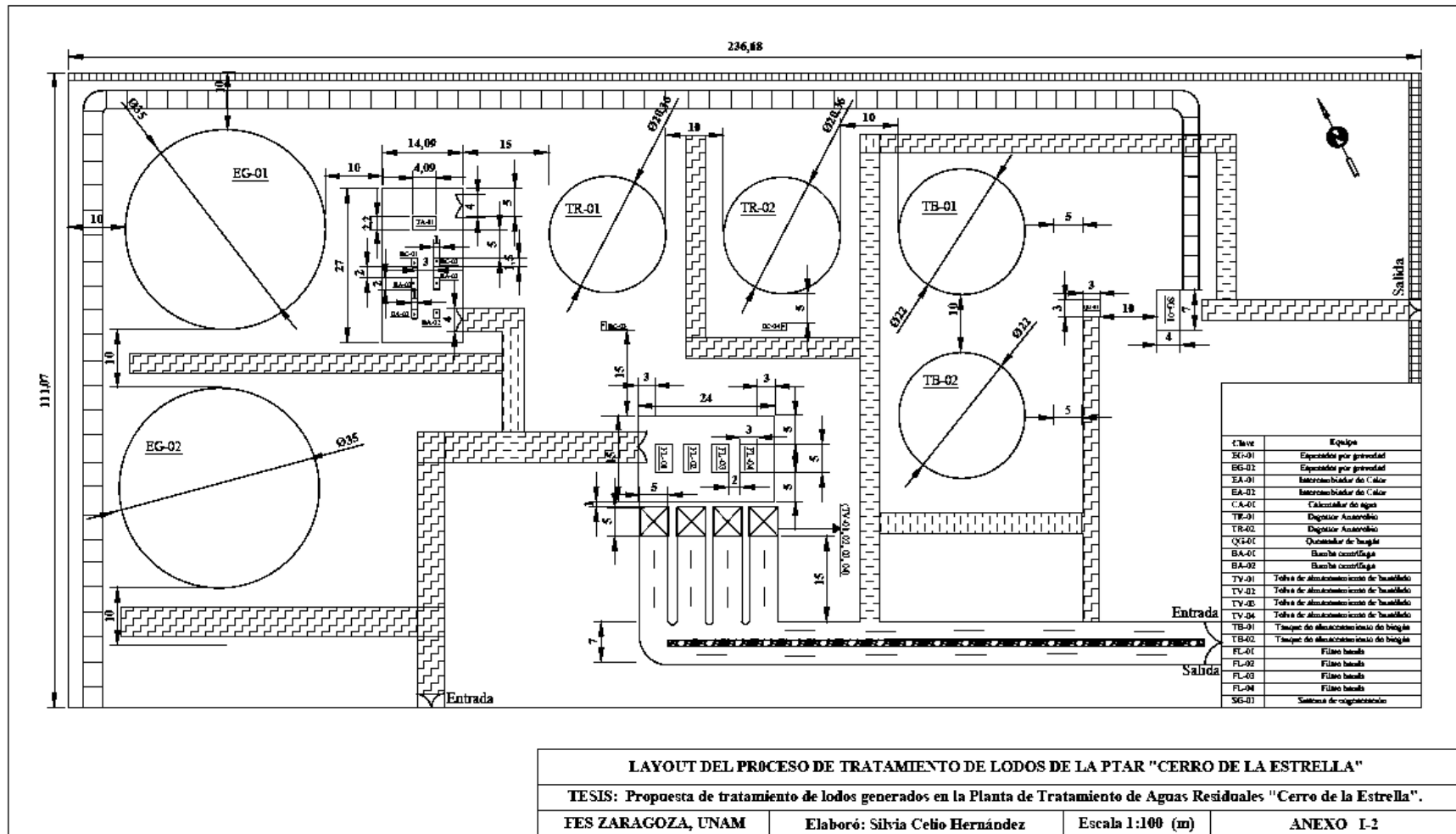




PROPUESTA DE TRATAMIENTO DE LODOS GENERADOS EN LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "CERRO DE LA ESTRELLA"



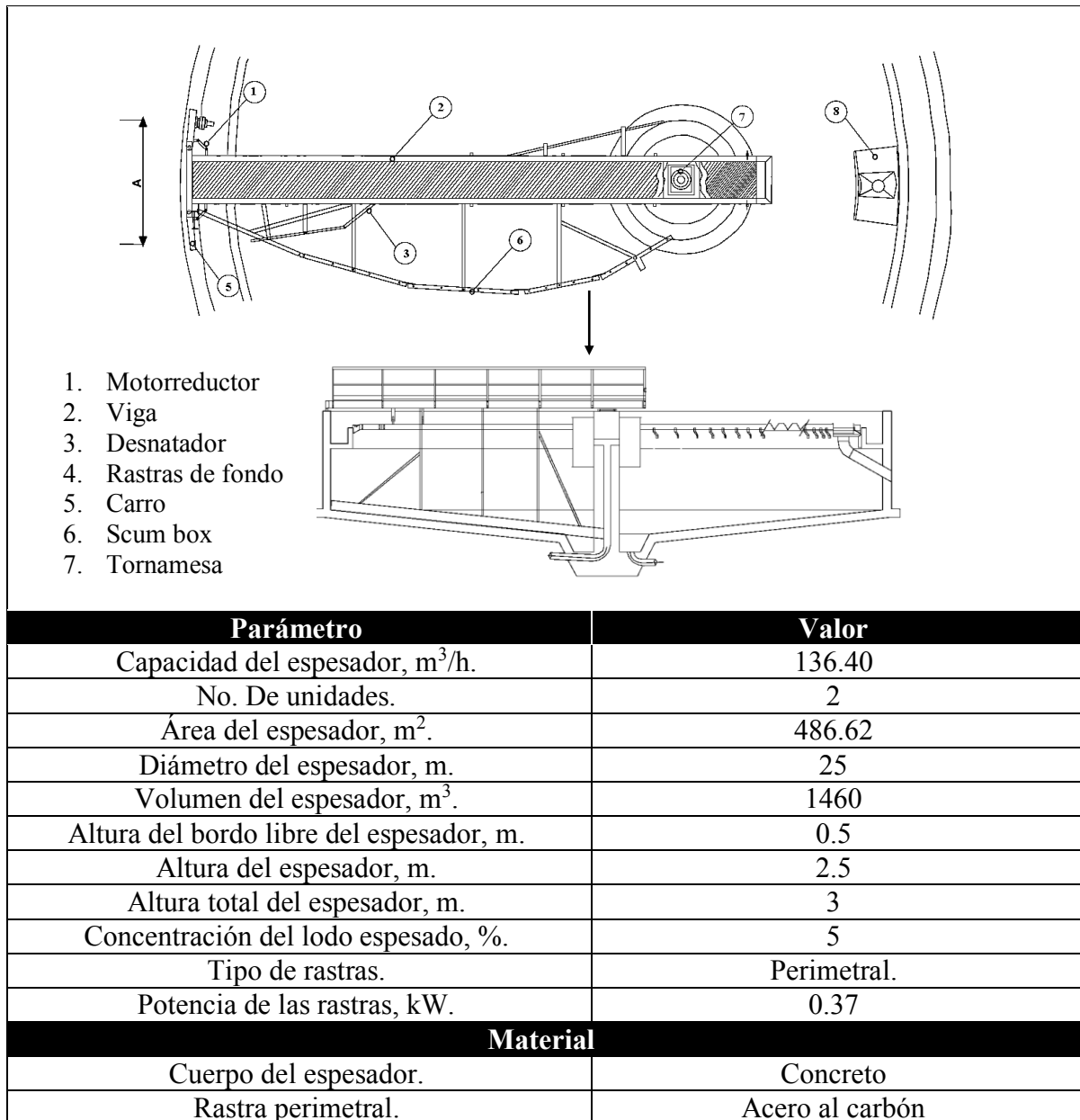
I-2 Layout del tren de tratamiento de lodos.



ANEXO II

CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS Y ESTRUCTURAS USADOS PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS.

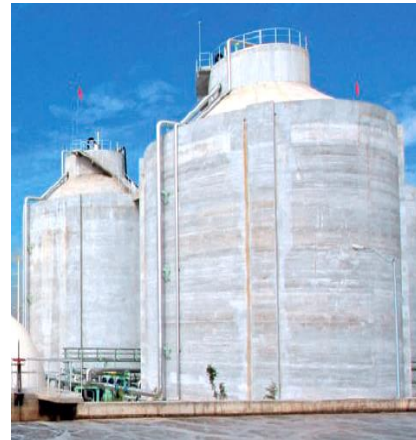
II-1 Espesador por gravedad (EG-01).



Elaboración propia.

II-2 Digestor anaerobio mesófilo (TR-01).

Parámetro	Valor
Capacidad del digestor, m ³ /h.	40.55
Tiempo de retención, TRH, d.	16
Temperatura, °C.	37
No. de unidades.	2
Volumen del digestor, m ³ .	7786.08
Área del digestor, m ² .	330.0636
Diámetro del digestor, m.	21
Altura del digestor, m.	24
Tipo de mezclador	Central
Potencia de mezclado, kW.	77.895
Material	
Estructura.	Concreto



PTAR Agua Prieta, Guadalajara, Jalisco.

Elaboración propia.

II-3 Intercambiador de calor tipo espiral (EA-01).



Parámetro	Nexson Group	
	Valor	
Flujo de lodo espesado, m ³ /h.	40.55	
Flujo de agua, m ³ /h.	87.74	
Temperatura de entrada del lodo, °C	15	
Temperatura de salida del lodo, °C.	37	
Temperatura de entrada del agua, °C	60	
Temperatura de salida del agua, °C.	54	
Calor requerido, BTU/h.	1026920.992	
No. de unidades.	2	
Tipo de intercambiador de calor.	Espiral	
Material de fabricación.	Acero al carbón	

Elaboración propia.

II-4 Calentador de agua (CA-01).



Calentador de agua, Powermaster.

Parámetro	Valor
Flujo de agua, m ³ /h.	87.74
No. de unidades.	1
Temperatura de entrada del agua, °C.	18
Temperatura de salida del agua, °C.	60
Calor requerido, BTU/h.	2053841.98
Capacidad mínima de calor, BTU/h.	2095757.12
Eficiencia, %.	98
Consumo de diesel, GPH.	16.11
Consumo de biogás, m ³ /h.	98.91

Elaboración propia.

II-5 Bombas

Clave	Fluido	Tipo	No. unidades	Caudal (m ³ /h)	Potencia, HP.
BC-01, 02	Lodo	Cavidad progresiva	2	40.55	5.5
BC-03, 04	Lodo	Cavidad progresiva	2	40.55	5.5



Bomba de cavidad progresiva, FLYGT

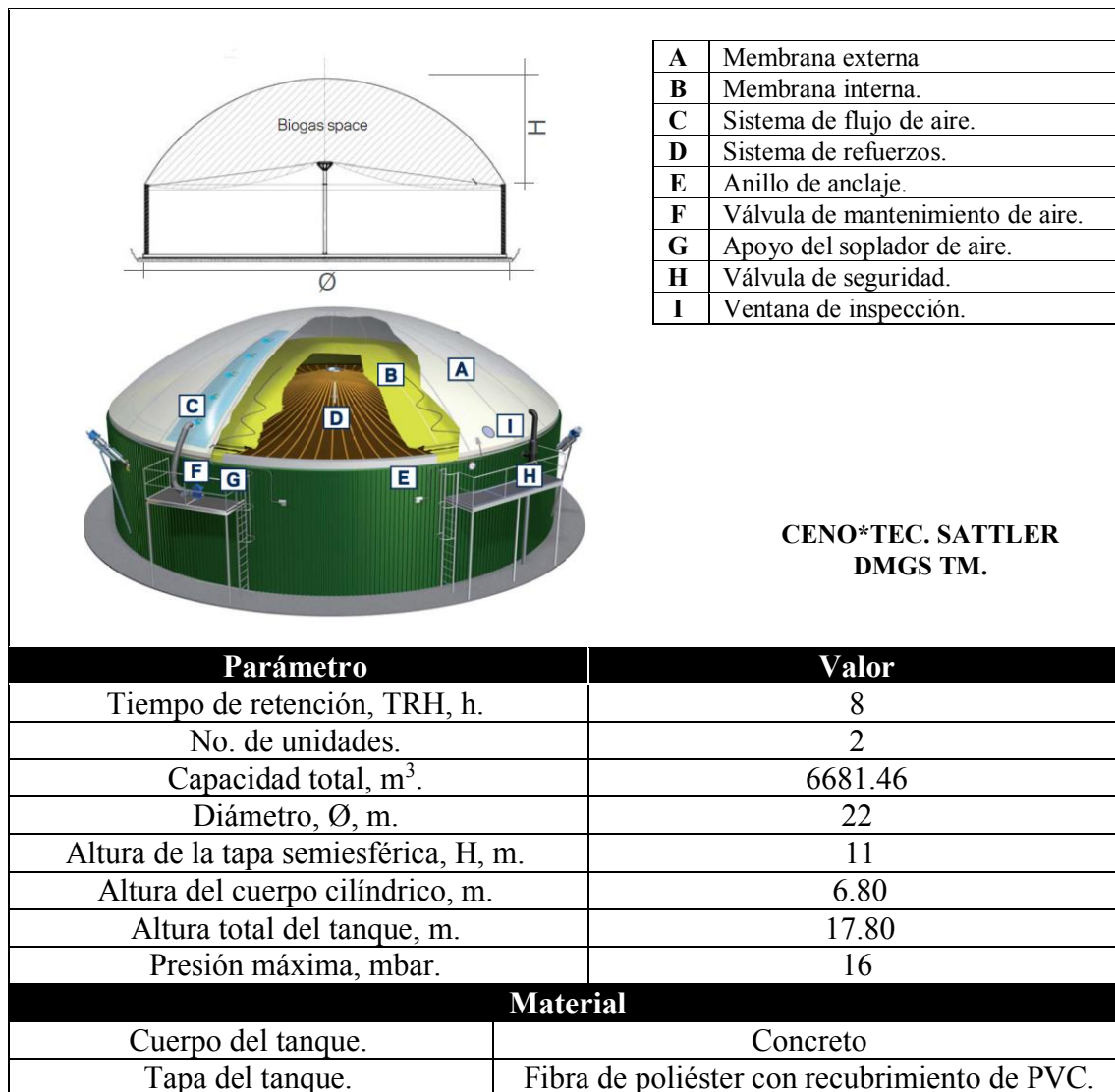
BA-01, 02	Agua	Centrífuga	2	87.74	5
-----------	------	------------	---	-------	---

Bomba centrífuga, RUHRPUMPEN



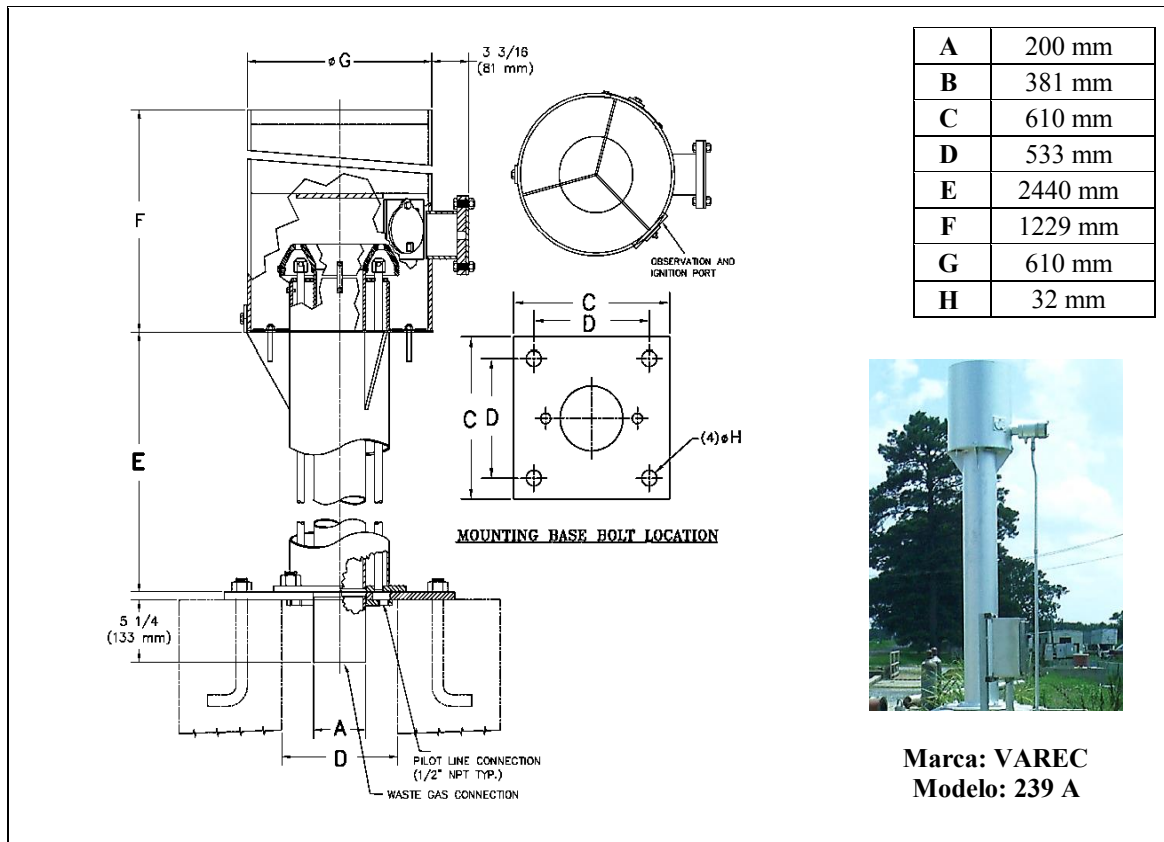
Elaboración propia.

II-6 Tanque de almacenamiento de biogás (TB-01).



Elaboración propia.

II-7 Quemador Biogás (QG-01).



Parámetro	Valor
Capacidad máxima, m ³ /h.	948
Tamaño del quemador, in.	8
DRE (Destruction removal Efficiency), %.	99
Orificio del piloto/accesorios.	304 SS
Presión máxima de entrada del biogás, mbar	50.8
Presión mínima de suministro de biogás del piloto, mbar.	20.3
No. de unidades.	1
Material	
Quemador.	Acero al carbón std. /Acero inoxidable.
Anillo piloto de flama.	Hierro fundido resistente al calor.
Puerto de encendido.	Hierro fundido std.

Elaboración propia.

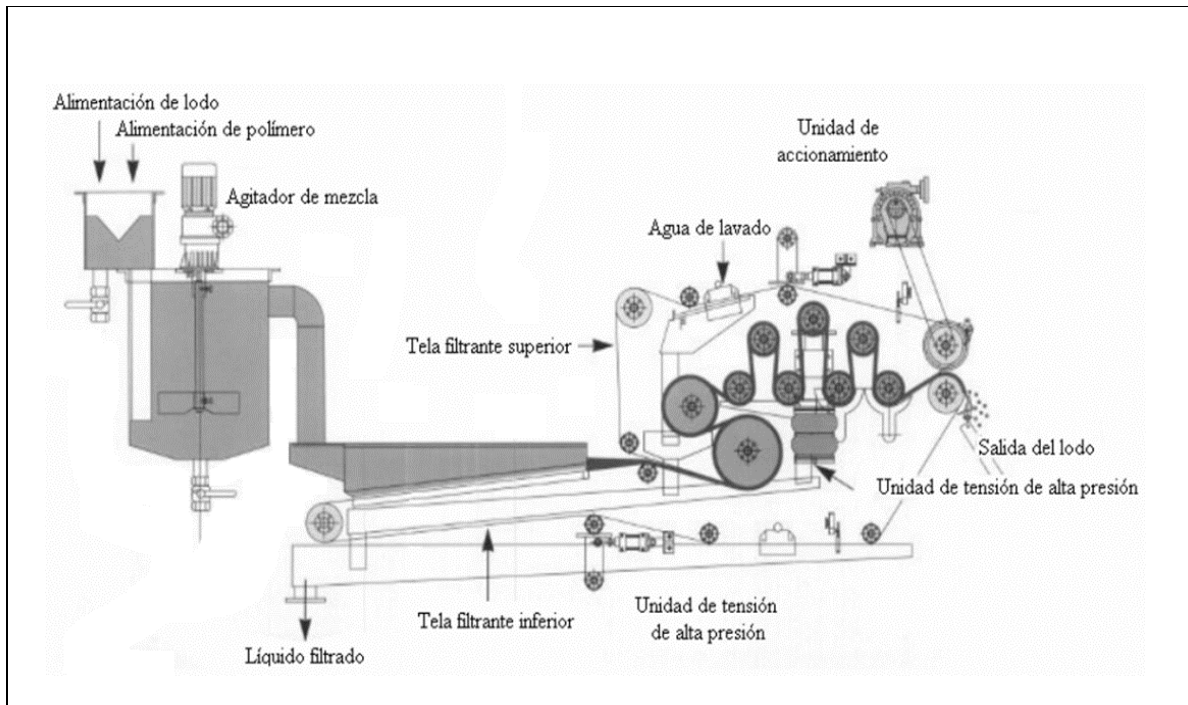
II-8 Sistema de cogeneración (SG-01).



Parámetro	Valor
Eficiencia eléctrica, %.	41.50
Eficiencia térmica, %.	43.70
Eficiencia total, %.	
Potencia.	
<i>kWe</i>	2000
<i>kWt</i>	2107
Consumo de energía, kW.	4817
Consumo de biogás nominal, m ³ /h.	689
Presión de gas requerida.	
<i>bar min.</i>	0.020
<i>bar máx.</i>	0.200
Emissiones NO _x , mg/Nm ³ .	≤500
Tensión, V.	440-480
No. de unidades.	1

Elaboración propia.

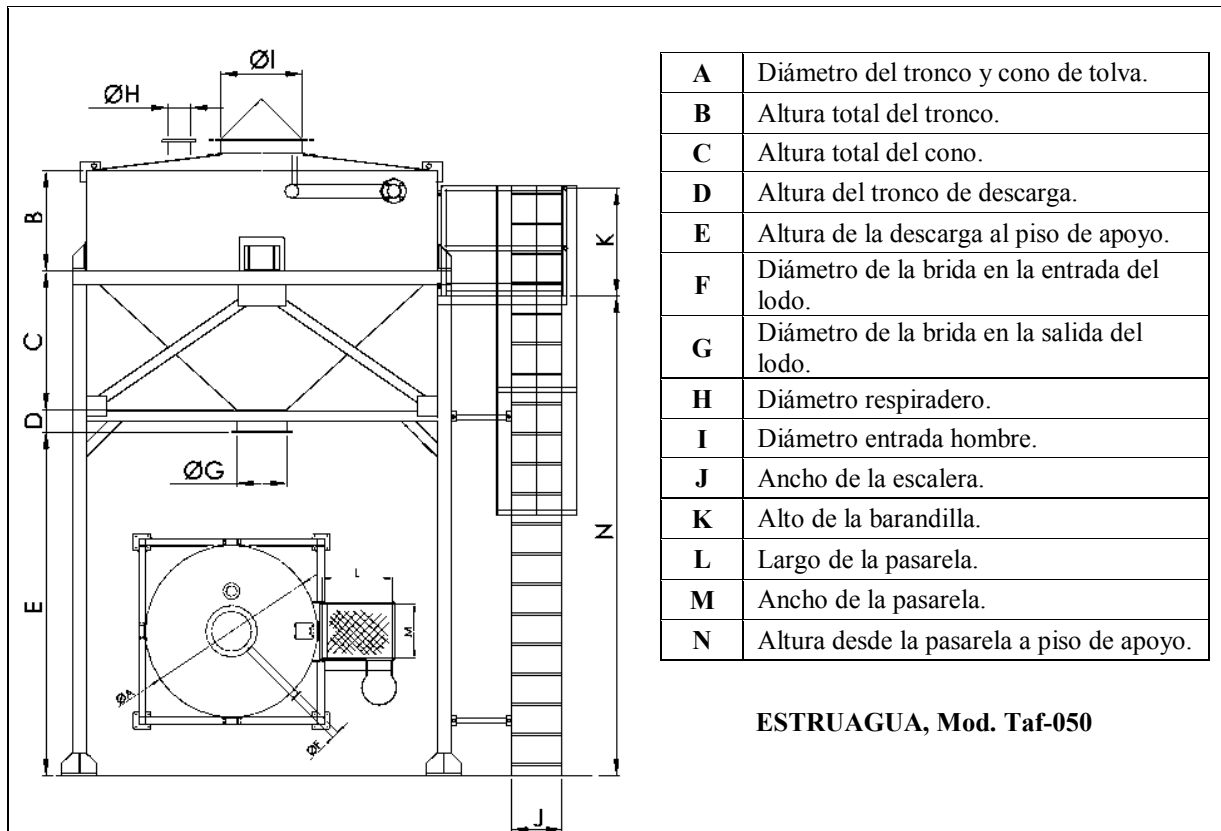
II-9 Filtro banda (FL-01).



Parámetro	Valor
Flujo volumétrico de lodos a deshidratar, m ³ /h.	40.55
Flujo másico de lodos deshidratados, Ton/d	155.11
Concentración de sólidos del lodo a la entrada del filtro, %.	3.12
Concentración de sólidos del lodo a la salida del filtro, %.	20
Dosificación de polímero, g/kg sólido seco.	5
Concentración de la disolución de polímero, %.	0.2
Ancho de banda, m.	3
No. de unidades.	4
Material	
Bandas de tela filtrante.	Poliéster o polipropileno monofilamento.
Rodillos.	Acero Inoxidable AISI 304
Raspadores.	Acero Inoxidable AISI 304
Bandejas recolectoras de agua.	Acero Inoxidable AISI 304
Tolva de alimentación y de descarga.	Acero Inoxidable AISI 304
Estructura.	Acero al carbón.

Elaboración propia.

II-10 Tolvas de almacenamiento de biosólido (TV-01).



ESTRUAGUA, Mod. Taf-050

Parámetro	Valor
Tiempo de retención, TRH, h.	28
No. de unidades.	4
Capacidad nominal, m ³ .	50
Ø Tronco y cono, (mm).	4500
Altura del tronco, (mm).	3000
Altura del cono, (mm).	1500
Distancia a piso de apoyo, (mm).	4000
Altura total, (mm).	9300
Dimensiones del hueco de salida, (mm).	500x500

Elaboración propia.

II-11 Camión de volteo para el transporte de biosólidos.



Parámetro	Valor
Tipo de camión.	Volteo
Marca	Kenworth
Capacidad de carga, kg.	20000
Capacidad de lastre, kg.	20000
Cilindros	8
Medida de neumático	24
Motor	Caterpillar 400
Año	1982
No. de unidades.	2

Elaboración propia.



ANEXO III

TABLAS DE RESULTADOS DEL PROCESO 2

Para el cálculo de las dimensiones del espesador por gravedad, del filtro banda y de las tolvas para el almacenamiento de biosólidos se utilizó la misma metodología y los criterios de diseño considerados para el proceso 1. En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos de la memoria de cálculo.

Tabla III-1 Espesamiento por gravedad.

Parámetro	Cantidad	Unidades
Concentración de sólidos de la mezcla de lodo.	1.32	%
Área del espesador.	973.26	m ²
Diámetro del espesador.	35	m
Número de unidades.	2	
Área por unidad.	486.63	m ²
Diámetro por unidad.	25	m
Volumen por unidad.	1460	m ³
Flujo de lodo espesado.	973.26	m ³ /d
Concentración de sólidos del lodo espesado.	5	%

Elaboración propia.

Tabla III-2 Deshidratación del lodo por filtro banda.

Parámetro	Cantidad	Unidades
Concentración inicial del lodo.	5	%
Concentración final del lodo.	20	%
Flujo de lodo espesado a deshidratar.	675.87	l/min
Ancho de banda a partir de la C_m , W.	19.01	m
Ancho de banda a partir de la C_h , W.	3.98	m
Número de unidades.	7	
Potencia del filtro.	4	HP
Caudal de agua de lavado, C_L .	5.1	l/s
Caudal total de agua de lavado, C_L .	35.7	l/s
Consumo de polímero por filtro banda.	243.31	kg/d
Consumo total de polímero.	1703.20	kg/d
Caudal diario de disolución de polímero.	121.66	m ³ /d
Caudal diario total de disolución de polímero.	851.60	m ³ /d
Caudal de lodo deshidratado.	243.31	m ³ /d

Elaboración propia.



Tabla III-3 Estabilización con cal.

Parámetro	Cantidad	Unidades
Sólidos en el lodo primario.	20733.9	kg/d
Sólidos en el lodo biológico/secundario.	27928.87	kg/d
Dosificación de Ca(OH)_2 para lodo primario.	0.12	lb Ca(OH)_2 /lb de sólidos secos
Dosificación de Ca(OH)_2 para lodo activado/secundario.	0.3	lb Ca(OH)_2 /lb de sólidos secos
Peso molecular del Ca(OH)_2 .	74	kg/kgmol
Peso molecular del CaO .	56	kg/kgmol
Pureza del CaO .	85	%
Densidad del CaO al 85%.	3370	kg/m ³
Dosificación de cal para el lodo primario.	5473.75	lb Ca(OH)_2 /d
Dosificación de cal para el lodo biológico.	18433.05	lb Ca(OH)_2 /d
Dosificación de cal total para la estabilización de la mezcla de lodos.	23906.80	lb Ca(OH)_2 /d
Flujo másico de CaO .	9674.67	kg CaO /d
Consumo de cal al año.	3531.25	Ton CaO /año
Número de unidades para estabilización (mezcladores).	2	
Potencia de los mezcladores.	7.5	HP
Tiempo de retención de la cal en el silo.	336	h
Volumen del silo para almacenamiento de cal.	6752.17	m ³
Número de unidades para almacenamiento.	2	
Capacidad nominal.	44.1	m ³
Diámetro	2.74	m
Altura	10.16	m

Elaboración propia.



Tabla III-4 Tolvas de almacenamiento de biosólidos.

Parámetro	Cantidad	Unidades
Tiempo de retención, TRH.	27	h
Flujo volumétrico total de lodos estabilizado.	246.18	m ³ /d
Flujo másico total de lodos estabilizado.	252.99	Ton/d
Volumen de total de la tolva.	276.96	m ³
Número de unidades.	7	
Volumen por unidad.	39.57	m ³
Capacidad nominal.	40	m ³
Diámetro del tronco y cono.	4000	mm
Altura del tronco.	3000	mm
Altura del cono.	1500	mm
Distancia al piso de apoyo,	4000	mm
Altura total.	9300	mm
Dimensiones del hueco de salida.	500X500	mm

Ref. Catálogo Tolva de almacenamiento de lodos, ESTRUAGUA, Mod. Taf-040.

Elaboración propia a partir de la memoria de cálculo y de la referencia antes citada.

ANEXO IV
FIGURAS Y TABLAS

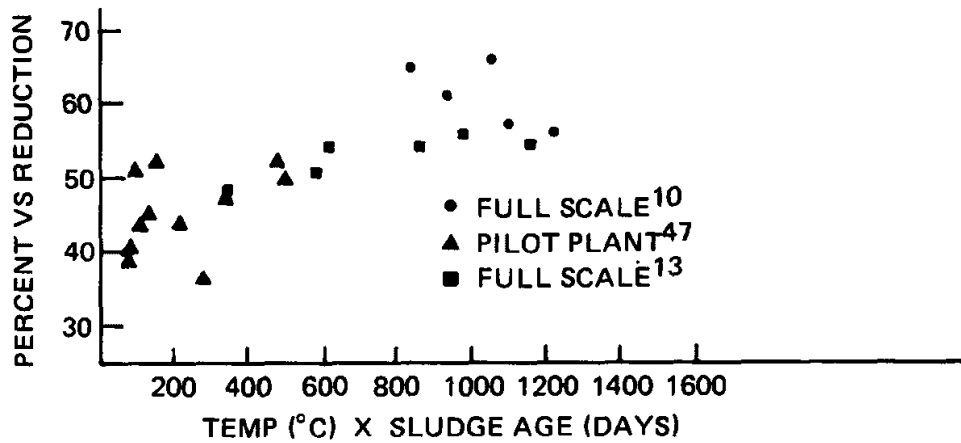


Figura IV-1 Reducción de sólidos volátiles vs temperatura x edad del lodo, de la mezcla de lodo primario y lodo activado digerida anaeróbicamente. Tomado de Sludge Treatment and Disposal Vol. 1, EPA 1978. Fig. 2-3.

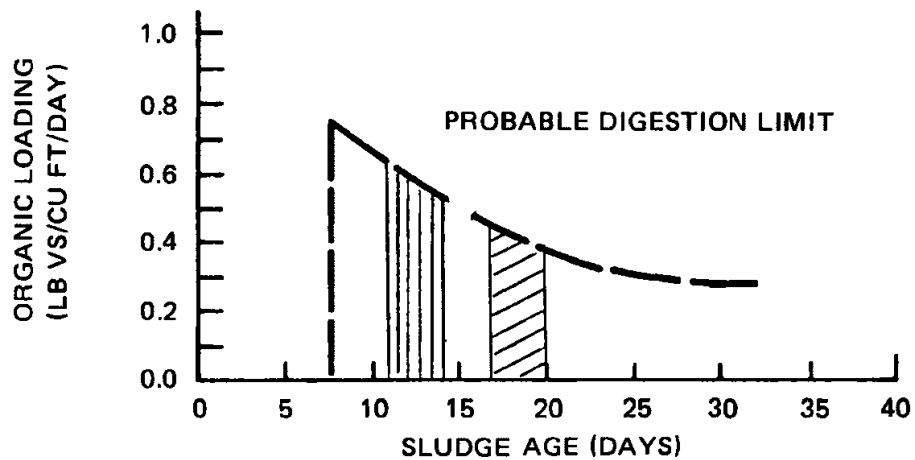


Figura IV-2 Relación entre la concentración de sólidos – la carga orgánica – la edad del lodo para la digestión anaerobia. Tomado de Sludge Treatment and Disposal Vol. 1, EPA 1978. Fig. 2-16.



Tabla IV-1 Datos típicos para el espesamiento por gravedad de diferentes tipos de lodos.

Tipo de lodo	Concentración de sólidos en la alimentación, %.	Concentración de sólidos esperados en el subflujo, %.	Carga de sólidos en la unidad, kg/m ³ d.
Lodos separados			
Primario (PRI)	2 – 7	5 – 10	100 – 150
Filtro percolador (TF)	1 – 4	3 – 6	40 – 50
Rotor biológico de contacto (RBC)	1 – 3.5	2 – 5	35 – 50
Lodo activado (WAS)			
WAS – Aire	0.5 – 1.5	2 – 3	20 – 40
WAS – Oxígeno	0.5 – 1.5	2 – 3	20 – 40
WAS – Aireación ext.	0.2 – 1.0	2 – 3	20 – 40
Sólidos digeridos anaeróbicamente en un digestor primario.	8	12	120
Acondicionamiento térmico del lodo			
Solo PRI	3 – 6	12 – 15	120 – 250
PRI + WAS	3 – 6	8 – 15	150 – 200
Solo WAS	0.5 – 1.5	6 – 10	100 – 150
Lodo terciario			
Cal alta	3 – 4.5	12 – 15	120 – 300
Cal baja	3 – 4.5	10 – 12	50 – 150
Hierro	0.5 – 1.5	3 – 4	10 – 50
Otros lodos			
PR + WAS	0.5 – 1.5	4 – 6	25 – 70
	2.5 – 4	4 – 7	40 – 80
PRI + TF	2 – 6	5 – 9	60 – 100
PRI + RBC	2 – 6	5 – 8	50 – 90
PRI + Hierro	2	4	30
PRI + Cal baja	5	7	100
PRI + Cal alta	7.5	12	120
PRI + (WAS + Hierro)	1.5	3	30
PRI + (WAS + Alumbre)	0.2 – 0.4	4.5 – 6.5	60 – 80
(PRI + Hierro) + TF	0.4 – 0.6	6.5 – 8.5	70 – 100
(PRI + Hierro) + WAS	1.8	3.6	30
WAS + TF	0.5 – 2.5	2 – 4	20 – 40
Digerido anaeróbicamente			
PRI + WAS	4	8	70
Digerido anaeróbicamente			
PRI + (WAS + Hierro)	4	6	70

Modificado de MOP 8, *Design of Municipal Wastewater Treatment, Vol. 3, WEF 2006, Table 20.1.*



Tabla IV- 2 Datos típicos de rendimiento para un filtro banda.

Tipo de lodo	Alimentación de sólidos secos, %.	Carga x ancho de banda		^a Polímero seco, g/kg de sólidos secos.	Sólidos en la torta, %	
		L/min	Kg/h		Típico	Rango
Primario crudo (P)	3 – 7	110 – 190	360 – 550	1 – 4	28	26 – 32
Lodo activado (WAS)	1 – 4	40 – 150	45 – 180	3 – 10	15	12 – 20
P + WAS (50:50) ^b	3 – 6	80 – 190	180 – 320	2 – 8	23	20 – 28
P + WAS (40:60) ^b	3 – 6	80 – 190	180 – 320	2 – 10	20	18 – 25
P + Filtro percolador (TF)	3 – 6	80 – 190	180 – 320	2 – 8	25	23 – 30
Digerido anaeróbicamente						
P	3 – 7	80 – 190	360 – 550	2 – 5	28	24 – 30
WAS	3 – 4	40 – 150	45 – 135	4 – 10	15	12 – 20
P + WAS	3 – 6	80 – 190	180 – 320	3 – 8	22	20 – 25
Digerido aeróbicamente						
P + WAS (50:50), sin espesar.	1 – 6	40 – 190	135 – 225	2 – 8	16	12 – 20
P + WAS (50:50), espesado.	4 – 8	40 – 190	135 – 225	2 – 8	18	12 – 25
Oxígeno activado WAS	1 – 3	40 – 150	90 – 180	4 – 10	18	15 – 23

^a Requerimientos de polímero basado en polímero de alto peso molecular (100% resistente, base seca).
^b La relación está basada en los sólidos secos para el lodo primario y activado.

Modificado de MOP 8, *Design of Municipal Wastewater Treatment, Vol. 3, WEF 2006, Table 21.3.*