

40 7
2es

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Química

TRATAMIENTO DE LODOS DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS. UNA PROPUESTA DE DISEÑO PARA LAS NECESIDADES ACTUALES EN MEXICO

TESIS
que para obtener el título de
INGENIERA QUIMICA
presenta
NOELIA DIAZ AYLLON

México, D. F., 1995

FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE	Prof. Eduardo Bárzana García
VOCAL	Prof. Simón González Martínez
SECRETARIO	Prof. Jesús González Pérez
1er. SUPLENTE	Prof. Hermilo Leal Lara
2do. SUPLENTE	Prof. Victor Manuel Luna Pabello

TESIS REALIZADA EN EL INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM

Asesor del tema: Dr. Simón González Martínez

Sustentante: Noelia Díaz Ayllón



Handwritten signatures of the advisor (Dr. Simón González Martínez) and the student (Noelia Díaz Ayllón).

RECONOCIMIENTO

Al Dr. Simón González Martínez un reconocimiento muy especial por su paciencia, su apoyo incondicional en la realización de este trabajo y sobretodo un agradecimiento infinito por sus valiosas aportaciones a mi formación profesional.

A mis padres con todo mi amor y agradecimiento por darnos su tiempo, su ejemplo, su amor, su vida y la mejor familia.

*Papito te amo, no te puedes imaginar todo lo que eres para mi, porque eres todo.
Neg, eres la más linda, gracias por todo.*

A mis hermanos Ana Lilia, Miguel, Rollo, Michel y Mi Cor, ah! y a mi Lechoncito, no hay palabras cuando los sentimientos rebasan inmensurablemente las barreras de la razón. Gracias a todos.

CONTENIDO

1. INTRODUCCION

- 1.1 Problemática
- 1.2 Antecedentes
- 1.3 Objetivos y alcances
- 1.4 Contenido

2. LODOS DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS

2.1 Producción y características

- 2.1.1 Lodos primarios
- 2.1.2 Lodos secundarios
- 2.1.3 Lodos químicos

2.2 Tratamiento de lodos

2.2.1 Espesamiento

- 2.2.1.1 Espesamiento por gravedad
- 2.2.1.2 Espesamiento por flotación con aire disuelto
- 2.2.1.3 Espesamiento por centrifugación

2.2.2 Estabilización

- 2.2.2.1 Digestión anaerobia
- 2.2.2.2 Digestión aerobia

- 2.2.2.3 Tratamiento con cal
- 2.2.2.4 Tratamiento con cloro
- 2.2.2.5 Composteo
- 2.2.2.6 Estabilización térmica

2.2.3 Desinfección

- 2.2.3.1 Desinfección química
- 2.2.3.2 Desinfección térmica
- 2.2.3.3 Desinfección mediante radiación

2.2.4 Acondicionamiento para la deshidratación

- 2.2.4.1 Acondicionamiento químico
- 2.2.4.2 Acondicionamiento térmico
- 2.2.4.3 Elutriación
- 2.2.4.4 Congelación

2.2.5 Deshidratación

- 2.2.5.1 Lechos de secado
- 2.2.5.2 Lagunas de secado
- 2.2.5.3 Filtración al vacío
- 2.2.5.4 Filtros prensa
- 2.2.5.5 Filtros banda
- 2.2.5.6 Centrifugación

2.2.6 Secado térmico

2.2.7 Procesos para la oxidación de materia orgánica

- 2.2.7.1 Incineración
- 2.2.7.2 Oxidación húmeda
- 2.2.7.3 Pirólisis

2.2.8 Disposición final

- 2.2.8.1 Relleno sanitario
- 2.2.8.2 Uso como mejorador de suelos
- 2.2.8.3 Disposición sobre terreno
- 2.2.8.4 Confinamiento controlado
- 2.2.8.5 Vertido al mar
- 2.2.8.6 Inyección en pozos profundos

2.3 Bombeo de lodos

- 2.3.1 Propiedades de flujo
- 2.3.2 Equipo de bombeo recomendable para transportar lodos
 - 2.3.2.1 Lodos con concentraciones de sólidos hasta 10%
 - 2.3.2.2 Lodos con concentraciones de sólidos hasta 25%
 - 2.3.2.3 Lodos con concentraciones de sólidos hasta 50%

3. NECESIDADES EN MEXICO

4. ESPESAMIENTO POR GRAVEDAD

4.1 Teoría

4.2 Equipo necesario

4.3 Diseño

4.3.1 Consideraciones de diseño

- 4.3.1.1 Carga superficial de sólidos
- 4.3.1.2 Carga hidráulica superficial
- 4.3.1.3 Tipo de lodos

4.3.2 Area superficial

- 4.3.2.1 Determinación del área con base en datos reportados

4.3.2.2 Determinación del área con base en pruebas de sedimentación

4.3.3 Profundidad total del tanque

4.3.4 Torque requerido

4.4 Operación y mantenimiento

5. ESTABILIZACION

5.1 Digestión anaerobia

5.1.1 Principios microbiológicos del proceso

5.1.2 Descripción del proceso

5.1.2.1 Digestión convencional

5.1.2.2 Digestión de alta tasa

5.1.2.3 Digestión en dos etapas

5.1.3 Consideraciones de diseño

5.1.3.1 Volumen del digestor

5.1.3.2 Producción de gas

5.1.3.3 Calor requerido

5.1.3.4 Mezclado

5.1.3.5 Reducción de material orgánico

5.1.3.6 Otras consideraciones

5.1.4 Procedimiento de diseño

5.1.5 Descripción del equipo

5.1.5.1 Tanques

5.1.5.2 Cubiertas

5.1.5.3 Equipo de mezclado

5.1.5.4 Equipo de calentamiento

5.1.6 Operación y mantenimiento

5.2 Digestión aerobia

5.2.1 Fundamentos del proceso

5.2.2 Descripción del proceso

5.2.2.1 Digestión aerobia convencional

5.2.2.2 Digestión aerobia termofílica

5.2.3 Consideraciones de diseño

5.2.3.1 Características del lodo

5.2.3.2 Temperatura de operación

5.2.3.3 Transferencia de oxígeno y requerimientos de mezclado

5.2.3.4 Tiempo de retención celular

5.2.3.5 Otras consideraciones

5.2.4 Descripción del equipo

5.2.4.1 Tanques

5.2.4.2 Equipo de aeración

5.2.5 Procedimiento de diseño

5.2.6 Operación y mantenimiento

5.3 Tratamiento con cal

5.3.1 Teoría

5.3.2 Descripción del proceso

5.3.3 Consideraciones de diseño

5.3.2.1 pH y tiempo de contacto

5.3.2.2 dosis

- 5.3.4 Efectos del proceso
- 5.3.5 Instalaciones necesarias

6. ACONDICIONAMIENTO PARA LA DESHIDRATACION

6.1 Factores que afectan el acondicionamiento

6.2 Acondicionamiento químico

6.2.1 Aplicación de sales inorgánicas

- 6.2.1.1 Cal
- 6.2.1.2 Sales de hierro
- 6.2.1.3 Otros
- 6.2.1.4 Cloruro férrico y cal: dosis típicas
- 6.2.1.5 Manejo y almacenamiento
- 6.2.1.6 Control del proceso

6.2.2 Aplicación de polielectrolitos orgánicos

- 6.2.2.1 Propiedades químicas y físicas de los polielectrolitos
- 6.2.2.2 Estructura en solución
- 6.2.2.3 Presentación
- 6.2.2.4 Dosis típicas
- 6.2.2.5 Aplicación
- 6.2.2.6 Equipo de alimentación

6.2.3 Mezclado

6.3 Elutriación

- 6.3.1 Descripción del proceso
- 6.3.2 Consideraciones de diseño

7. DESHIDRATACION

7.1 Lechos de secado

- 7.1.1 Principios de operación
- 7.1.2 Consideraciones de diseño
- 7.1.3 Elementos estructurales
- 7.1.4 Espectativas de funcionamiento
- 7.1.5 Operación y mantenimiento

7.2 Filtros prensa

- 7.2.1 Principios de operación
 - 7.2.1.1 Filtros prensa de marco y placas
 - 7.2.1.2 Filtros prensa de diafragma
- 7.2.2 Descripción del equipo
- 7.2.3 Sistemas de apoyo
- 7.2.4 Consideraciones de diseño
- 7.2.5 Factores de operación
- 7.2.6 Criterios para la selección del equipo
- 7.2.7 Operación y mantenimiento

7.3 Filtros banda

- 7.3.1 Principios de operación
- 7.3.2 Descripción del equipo
- 7.3.3 Sistemas de apoyo
- 7.3.4 Consideraciones de diseño
- 7.3.5 Factores de operación
- 7.3.6 Recomendaciones generales
- 7.3.7 Operación y mantenimiento

8. DISPOSICION FINAL

8.1 Uso como mejorador de suelos

- 8.1.1 Características del sitio y consideraciones del suelo
- 8.1.2 Lodo como fertilizante y acondicionador de suelos
- 8.1.3 Aplicación en suelos agrícolas
- 8.1.4 Aplicación en suelos forestales
- 8.1.5 Manejo, transporce y aplicación del lodo

8.2 Relleno sanitario

- 8.2.1 Consideraciones previas
- 8.2.2 Consideraciones de diseño
 - 8.2.2.1 Factores climatológicos
 - 8.2.2.2 Producción y comportamiento de lixiviados
 - 8.2.2.3 Estudios geotécnicos y geohidrológicos
- 8.2.3 Métodos de diseño y operación
 - 8.2.3.1 Formación de las celdas

9. RESUMEN, CONCLUSIONES Y PROPUESTA FINAL

REFERENCIAS

1. INTRODUCCION

1.1 Problemática

En México, la descarga de aguas residuales domésticas e industriales sin ser precedida de tratamiento alguno, ha sido la práctica más común durante muchos años; sin embargo, la escasez de recursos hidráulicos y los crecientes volúmenes de aguas residuales originados por el acelerado crecimiento de la población y el desarrollo del sector industrial, han obligado a instalar cada vez más plantas para tratamiento de aguas residuales, de acuerdo a las necesidades y recursos económicos nacionales.

Actualmente, el país cuenta con 223 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales con una capacidad de 16.5 m³/s y con 177 plantas de tratamiento de agua residual industrial con una capacidad estimada de 12 m³/s, lo que en ambos casos representa aproximadamente el 15% de la generación total de aguas residuales (SEDUE, 1989). Ahora bien, aunque esto demuestra que el tratamiento

de aguas residuales en México se lleva a cabo aún en baja escala, hay que hacer notar que dicho tratamiento produce invariablemente desechos secundarios como producto de la separación que deben ser dispuestos de manera adecuada. Sin duda, el residuo de mayor volumen y cuyo tratamiento es más complejo, lo constituyen los sólidos en suspensión que se generan durante el tratamiento y son conocidos comúnmente como "lodos".

Los lodos están formados en su mayor parte por agua (95-99.5%) y contienen la mayor parte de la materia indeseable que es separada del agua residual, ya sea durante los procesos de separación física, biológicos o por efecto de la precipitación química.

En países desarrollados, el tratamiento de lodos se considera parte integral del tratamiento de aguas residuales; sin embargo, en México, sin poder dar un número exacto, se sabe con certeza que muy pocas plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas cuentan con instalaciones para tratamiento de lodos y de éstas casi ninguna los trata regularmente (Hernández, 1990).

1.2 Antecedentes

En la mayoría de las publicaciones nacionales sobre tratamiento de aguas residuales, principalmente desde los años setenta, se reconoce la importancia y necesidad de tratar los lodos (SRH, 1974; SAHOP, 1979; DDF, 1982; SEDUE, 1988); sin embargo, muy pocas plantas para tratamiento de aguas residuales domésticas cuentan con algún sistema para tratarlos. Algunas de ellas son: la Planta Nabor Carrillo en Texcoco, Estado de México y las plantas de Chapultepec y San Luis Tlaxialtemalco en el Distrito Federal (DDF, 1987). En el Distrito Federal existe un reglamento de uso de alcantarillado que prohíbe la descarga de lodos directamente al drenaje y, a pesar de esto, la mayoría de las plantas lo hace.

Entre las principales causas que han originado esta situación están la falta de reglamentación adecuada que limite las características con las que estos residuos

deben ser dispuestos finalmente, la falta de recursos económicos y, sobre todo, la falta de información al respecto.

Tratando de establecer bases para resolver este problema, la Comisión Nacional del Agua, organismo dependiente de la SARH, lleva a cabo un estudio que pretende concluir a mediados de 1991, cuando efectúe un censo de plantas para tratamiento de aguas residuales domésticas en todo el país (Hernández, 1990). Por medio de él se obtendrá información general acerca de cuestiones administrativas, tipo de instalaciones, forma de operación, caudal de tratamiento, características del agua y una parte importante acerca de lodos, que incluye características, producción aproximada, tipo de tratamiento si lo tienen, etc.

1.3 Objetivos y Alcances

El esfuerzo citado anteriormente justifica aún más la realización de este trabajo, ya que pretende servir de complemento para seguir adelante con la solución del problema del tratamiento y disposición de lodos, tratando de cumplir con los siguientes objetivos y alcances:

- 1.- Con base en un análisis de las ventajas y desventajas de diferentes sistemas para tratamiento de lodos de aguas residuales domésticas, seleccionar y proponer aquellos cuya instalación y operación sean factibles de acuerdo a las necesidades y limitaciones del país.
- 2.- Proponer y establecer un procedimiento general para el diseño de dichos sistemas y describir los procesos involucrados en ellos.

Este trabajo pretende condensar información básica sobre tratamiento de lodos residuales de origen doméstico, de manera que pueda utilizarse como un manual que establece el procedimiento de diseño para los sistemas propuestos y criterios para seleccionar un tren de tratamiento apropiado de acuerdo con las necesidades específicas de cada caso.

1.4 Contenido

El capítulo 2 describe, de forma general, la producción y características de diferentes tipos de lodos domésticos, algunos métodos para su tratamiento y las ventajas y desventajas de los procesos involucrados.

En el capítulo 3 se hace un análisis de las necesidades y posibilidades tecnológicas y socioeconómicas del país, para así poder efectuar una selección de sistemas para tratamiento de lodos adecuados a ellas.

A partir del capítulo 4 se describen con más detalle los procesos involucrados en los sistemas propuestos, especificando en cada caso el procedimiento para su diseño.

2. LODOS DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS

Las aguas residuales domésticas o municipales son aquellas generadas en zonas habitacionales, establecimientos comerciales e instalaciones similares, es decir, no contienen descargas importantes de origen industrial. Su tratamiento se lleva a cabo en etapas:

- a) Pretratamiento. Tiene como objetivo la separación de sólidos voluminosos (fibras, plásticos, madera, piedras, arena, grava, etc.). Se lleva a cabo mediante rejillas de separación, tamices y desarenadores.
- b) Tratamiento Primario. Consiste en la separación física de las partículas de baja densidad suspendidas en el agua. Generalmente se efectúa por sedimentación, pero también se puede llevar a cabo por flotación.
- c) Tratamiento Secundario. Su función principal es la eliminación de sustancias orgánicas sólidas biodegradables. Para efectuarlo se emplean procesos fisicoquímicos o biológicos. En estos últimos, los microorganismos presentes

consumen la mayor parte de la materia orgánica del agua residual, generando un crecimiento de la masa bacteriana o biomasa, que se comporta como material en suspensión y debe separarse del agua por medio de un sedimentador secundario.

- d) Tratamiento Terciario (o avanzado). Es un tratamiento complementario opcional que permite mejorar la calidad del efluente obtenido en el tratamiento secundario, eliminando de forma específica algunos contaminantes que no son separados mediante los tratamientos clásicos.

Los procesos para el tratamiento de aguas residuales generan lodos provenientes del material separado y como producto de la depuración misma. Dichos lodos contienen grandes cantidades de agua y material orgánico.

2.1 Producción y Características

Los lodos producidos durante el tratamiento de aguas residuales domésticas se clasifican de acuerdo con su origen en lodos primarios, secundarios o químicos y, de acuerdo con su estado o tratamiento recibido, en lodos crudos o frescos, lodos digeridos, húmedos, secos, etc. Dependiendo de esto, las características y concentración de sólidos suspendidos varían, afectando de una u otra forma su tratamiento.

Los lodos primarios son los resultantes de procesos de separación sólido-líquido durante el tratamiento primario (sedimentación, flotación). Contienen partículas sólidas sedimentables, principalmente de naturaleza orgánica.

Los lodos secundarios, también conocidos como lodos biológicos, consisten predominantemente de la biomasa producida en exceso durante los procesos de tratamiento biológico y de material orgánico parcialmente descompuesto. En las plantas que utilizan además productos químicos, ya sea para precipitar y remover fósforo o simplemente para mejorar la sedimentación, se generan lodos químicos

que generalmente se encuentran mezclados con los lodos primarios y/o con los biológicos.

La tabla 2.1 presenta algunas características físicas de lodos generados durante el tratamiento de aguas por medio de diferentes procesos.

TABLA 2.1 CARACTERISTICAS FISICAS DE LODOS PRODUCIDOS EN ALGUNOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO (Adaptada de Metcalf y Eddy, 1979).

Proceso	Densidad relativa de los sólidos en el lodo	Densidad relativa del lodo	Sólidos secos (kg/10 ³ m ³)	
			Intervalo	Valor típico
Sedimentación primaria	1.4	1.020	110-170	150
Lodos activados	1.25	1.005	70-100	85
Filtro percolador	1.45	1.025	55-90	70
Aeración extendida	1.30	1.015	80-120	100 ^a
Lagunas de aeración	1.30	1.010	80-120	100 ^a
Filtración	1.20	1.005	10-20	15
Remoción de fósforo con productos químicos				
cal (350-500 mg/l)	1.90	1.04	250-400	300 ^b
cal (800-1600 mg/l)	2.20	1.05	600-1280	800 ^b

^a Sin tratamiento primario

^b Valor adicional al normalmente obtenido por sedimentación primaria

2.1.1 Lodos Primarios

Los lodos primarios son generalmente de color grisáceo y despiden olores desagradables. Las características y composición de los lodos primarios varían

principalmente de acuerdo con las características del agua residual; también contienen arena que no fue retenida en las cámaras desarenadoras, algunos microorganismos, materia orgánica y nutrientes como nitrógeno y fósforo.

TABLA 2.2 CARACTERISTICAS DE LODOS PRIMARIOS
(Adaptada de EPA, 1979).

Característica	Intervalo	Valor típico	Comentarios
Sólidos secos totales (% en peso)	2-8	5	-
Sólidos volátiles (% en peso)	64-93	77	Valor obtenido en 42 muestras de lodo con desarenación eficiente. Valores bajos, causados por lluvias.
	60-80	65	
	-	40	
Densidad relativa de los sólidos	-	1.4	Aumenta con grava, arena gruesa
Densidad relativa del lodo (húmedo)	-	1.02	Aumenta con la densidad relativa de los sólidos. Lodos provenientes de sistemas de alcantarillado combinados.
		1.07	
Producción normal (kg/m ³ de agua residual)	-	3	-
Contenido térmico (MJ/kg, base seca)	15.78-23.2	-	Depende del contenido de materia volátil y composición del lodo. 74% sólidos volátiles 65% sólidos volátiles
		10.28	
		7.6	
pH	5-8	6	-
Alcalinidad (mg/l CaCO ₃)	500-1500	600	-
Nitrógeno (N, % sólidos totales)	1.5-6.0	4.0	-
Fósforo (P ₂ O ₅ , % sólidos secos)	0.8-3.0	2.0	-
Acidos volátiles (mg/l ac. acético)	200-2000	500	-
Grasas y aceites (% base seca)	6.0-30.0	-	Extracción con éter
Proteínas (%)	20-30	25	-
DBO/SSV ^a	0.5-1.1	-	-
DQO/SSV ^a	1.2-1.6	-	-
N-org/SSV ^a	0.05-0.06	-	-

^a DBO = demanda bioquímica de oxígeno.
DQO = demanda química de oxígeno.
N-org = nitrógeno orgánico.
SSV = sólidos suspendidos volátiles.

Su tratamiento es normalmente más sencillo que el de los lodos biológicos y químicos, principalmente porque se obtienen mejores resultados cuando se espesan por gravedad y porque cuando se deshidratan por medios mecánicos requieren menos acondicionamiento: forman una torta más seca y proporcionan una mejor captura de sólidos. La tabla 2.2 enlista algunas características de los lodos primarios.

La producción de lodos primarios en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas típicas se encuentra entre 100 y 300 gramos de masa seca por metro cúbico de agua residual tratada (Cheremisinoff, 1988). Para una estimación más precisa debe determinarse la carga total de sólidos suspendidos en el influente al sedimentador primario y suponer el porcentaje de remoción, el cual generalmente se encuentra entre 50% y 65% para agua residual sin contaminantes industriales, floculantes o coagulantes químicos ni corrientes secundarias de los sistemas para tratamiento de lodos (EPA, 1979).

Si no es posible determinar la cantidad de sólidos suspendidos en el influente, es posible hacer una estimación suponiendo un valor entre 0.07 y 0.11 kg/persona/día (EPA, 1979). El porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales en el sedimentador primario puede estimarse usando datos de la operación mediante pruebas de laboratorio para la determinación de material sedimentable bajo condiciones ideales (APHA, 1985). La producción de lodos en tanques reales es ligeramente menor.

2.1.2 Lodos Biológicos

Las características y composición de los lodos biológicos dependen básicamente del sistema para tratamiento biológico empleado (lodos activados, filtro percolador, biodisco, etc.) y de la velocidad de crecimiento y metabolismo de los microorganismos (Cheremisinoff, 1988). En general son más difíciles de espesar y deshidratar que los lodos primarios y que la mayoría de los lodos químicos. Su olor

es menos desagradable que el de los lodos primarios; sin embargo, si se les deja sin aeración más de un día adquieren color negro, aspecto y olor desagradables.

TABLA 2.3 CARACTERISTICAS DE LODOS PROVENIENTES DEL SISTEMA LODOS ACTIVADOS (Adaptada de EPA, 1979)

Característica	Intervalo	Valor típico	Comentarios
Sólidos secos totales (% en peso)	0.5-1.2	1.0	-
Sólidos volátiles (% en peso)	61-75	63	-
Densidad relativa de los sólidos	-	1.08	-
Densidad relativa del lodo	-	$1 + 7 \times 10^{-8} \times C$	C = concentración de sólidos suspendidos (mg/l).
Color típico	-	-	Café
Producción normal (kg/m ³ de agua residual)	-	18	-
Contenido térmico (MJ/kg)	15.17-35.26	-	Aumenta con el contenido de materia volátil.
pH	6.5-8.0	-	Puede ser menor en sistemas con oxígeno puro o si hay descomposición anaerobia.
Carbono orgánico (% en peso sólidos secos)	17-41 23-44	- -	- Promedio de cuatro plantas.
Nitrógeno (N, % en peso sólidos secos)	3.0-6.7	5.6	-
Fósforo (P ₂ O ₅ , % en peso sólidos secos)	3.0-7.0	-	-
Potasio (K ₂ O, % en peso sólidos secos)	-	0.56	-
Grasas (% en peso de sólidos secos)	5-12	-	Extracción con éter
Proteínas (% en peso de sólidos secos)	20-30	25	-
Celulosa (% en peso de sólidos secos)	32-41	37	-
DQO/SSV ^a	-	2.7	-

^a Relación entre la demanda química de oxígeno y los sólidos suspendidos volátiles.

Los lodos generados durante el proceso de lodos activados contienen concentraciones de sólidos muy bajas. Generalmente son de color café dorado y de apariencia floculenta. Contienen mayores cantidades de fósforo, nitrógeno y proteínas que los lodos primarios, pero menos grasas y celulosa. La tabla 2.3 presenta datos sobre la composición y características de lodos producidos durante el proceso de lodos activados.

Las variables más importantes para predecir la producción de este tipo de lodos son la cantidad de materia orgánica eliminada durante el proceso, la masa de microorganismos en el sistema, los sólidos biológicamente inertes en el influente al proceso y los sólidos suspendidos en el efluente (EPA, 1979).

Estas variables se relacionan de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$P_x = (Y)(S_r) - (k_d)(M) \quad (2.1)$$

$$PLA = P_x + I_{NV} - E_T \quad (2.2)$$

donde:

P_x	Crecimiento neto de sólidos biológicos, expresado como sólidos suspendidos volátiles, en kg/d
Y	Coefficiente de rendimiento, expresado como sólidos suspendidos volátiles, en kg/kg de sustrato
S_r	Sustrato eliminado (por ejemplo, como DBO_5), en kg/d
k_d	Coefficiente de decaimiento, en d^{-1}
M	Masa de microorganismos en el sistema, expresada como sólidos suspendidos volátiles, en kg/d
PLA_T	Producción total de lodos en el sistema, en kg/d
I_{NV}	Sólidos suspendidos no volátiles alimentados al proceso, en kg/d
E_T	Sólidos suspendidos en el efluente, en kg/d

Estas ecuaciones, tal como se presentan o con ligeras variaciones, son muy útiles y ampliamente utilizadas para estimar la producción de lodos biológicos. Para emplear la ecuación 2.1 es necesario obtener valores de Y y k_d , de preferencia

experimentalmente. La tabla 2.4 presenta valores representativos de estos parámetros.

TABLA 2.4 VALORES DE COEFICIENTES DE RENDIMIENTO Y DECAIMIENTO PARA CALCULAR LA PRODUCCION DE LODOS ACTIVADOS (EPA, 1979)

γ^a	k_d^b	Tratamiento previo del agua residual	Escala	Aeración	Temperatura (°C)	Edad del lodo ^c	Calculo de remoción de DBO_5^d (días)
0.5	0.055	sedimentación	laboratorio	aire	19-22	2.8-22	I
0.70	0.04	sedimentación	piloto	oxígeno	no establecida	1.0-4.0	I menos E
0.67	0.06	sedimentación	gran escala	aire	18-27	1.2-8	I menos E
0.73	0.075	sedimentación	piloto	aire	10-16	1-12	I menos E
0.94	0.14	sedimentación (incluyendo licores de deshidratación)	piloto	aire	15-20	0.5-8	I menos E soluble
0.73	0.06	sedimentación	piloto	oxígeno	18-22	2.5-17	I menos E
0.5	-	sedimentación (base militar)	piloto	aire	0-7	e	I
0.74	0.04	sedimentación (influencia industrial)	piloto	oxígeno	17-25	2.1-5	I menos E soluble
1.57	0.07	pretratamiento (incluyendo licores de deshidratación)	piloto	aire	15-20	0.6-3	I menos E soluble
1.825	0.20	pretratamiento	laboratorio	aire	4-20	1-3	I soluble menos E soluble
0.65	0.043	pretratamiento	laboratorio	aire	20-21	e	I menos E
0.70	0.048	pretratamiento	laboratorio	aire	20-21	e	I menos E
0.54	0.014	pretratamiento	gran escala	aire	no establecida	e	I menos E
1.1	0.09	ninguno	gran escala	aire	no establecida	1.1-2.4	I menos E

^a Coeficiente de rendimiento, (lodos producidos como kg SSV/kg DBO_5)

^b Coeficiente de decaimiento, $días^{-1}$

^c Tiempo medio de retención celular o edad del lodo medido como masa de SSV en licores mezclados dividida por la producción de sólidos biológicos

^d I = influente, E = efluente

^e Superior a 11 (aeración extendida)

El lodo formado en filtro percolador, es similar al de lodos activados; sin embargo, se han desarrollado modelos matemáticos específicos para predecir su producción (EPA, 1979). La cantidad de sólidos volátiles en el lodo puede estimarse, considerando que la masa total de microorganismos presentes en sistemas de película fija es proporcional al área superficial disponible para el crecimiento de la biopelícula.

Los lodos producidos en biodisco aún no han sido tan estudiados como los de los sistemas biológicos antes mencionados; sin embargo, se sabe que es similar en concentración de sólidos, contenido de nutrientes y otras características al lodo formado en filtro percolador (EPA, 1979). La tabla 2.5 presenta algunos valores de la producción de lodos de aguas residuales domésticas, generalmente aceptados en plantas que operan con filtro percolador y biodisco.

TABLA 2.5 PRODUCCION TOTAL DE LODOS EN PLANTAS QUE OPERAN CON SISTEMAS BIOLÓGICOS DE PELICULA FIJA (WPCF, 1988).

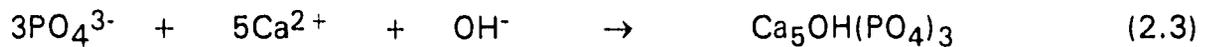
	Filtro Percolador	Biodisco
	g SST/kg DBO eliminada	g SST/kg DBO eliminada
Promedio anual	600 - 800	400 - 500
Meses pico	1000 - 1500	900 - 1000
Valor máximo	2000 - 3000	2000 - 3000

2.1.3 Lodos Químicos

Los lodos químicos se generan cuando durante el tratamiento de aguas residuales se aplican productos químicos. Entre los más comúnmente empleados se encuentran el hidróxido de calcio (cal), sulfato de aluminio, sales de fierro y algunos polímeros.

Este tipo de lodos, normalmente se puede tratar con el equipo y los métodos convencionalmente usados para el manejo de lodos primarios y secundarios; sin embargo, la dosis y naturaleza del agente químico empleado puede alterar sus propiedades, básicamente en relación con la deshidratación y el espesamiento (JAWWA, 1981). Por ejemplo, la aplicación de cal produce un lodo que en general espesa y deshidrata mejor que el mismo lodo sin la aplicación de productos químicos mientras que la aplicación de coagulantes de fierro y aluminio producen flóculos gelatinosos difíciles de deshidratar (Culp *et al*, 1978). Otro factor importante que determina las características de los lodos químicos es la cantidad del material orgánico presente en la mezcla; por ejemplo, la presencia de grandes cantidades de sólidos procedentes del sistema de lodos activados puede hacer que los lodos producidos por tratamiento con cal deshidraten con más dificultad.

La producción de lodos químicos depende del agente químico y del punto de aplicación: puede estimarse con base en la estequiometría de las reacciones químicas involucradas y a partir de resultados experimentales obtenidos mediante pruebas de jarras (Culp *et al*, 1978). Las ecuaciones básicas para los cálculos pueden simplificarse de la siguiente manera:



$$\sum \text{coagulantes entrada} = \sum \text{coagulantes salida} \quad (2.11)$$

De acuerdo con los cálculos efectuados por EPA (1973) para estimar la producción de lodos químicos, Culp *et al* (1978) informa que la cantidad total de lodos generada por la aplicación de algunos productos químicos es la siguiente:

400 mg/l de cal $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ producen 754 g/m^3 de lodos

200 mg/l de sulfato de aluminio $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}]$ producen 247 g/m³ de lodos

80 mg/l de cloruro férrico $[\text{FeCl}_3]$ producen 249 g/m³ de lodos

2.2 Tratamiento de lodos

Los objetivos principales del tratamiento de lodos son reducir su contenido de agua para hacer más económico su manejo, minimizar la cantidad de organismos patógenos, reducir los malos olores causados por condiciones anaerobias y eliminar otros constituyentes indeseables. De esta manera, un tren de tratamiento de lodos debe incluir procesos para reducir su contenido de material orgánico y de agua.

La figura 2.1 muestra distintas opciones y la clasificación básica de los procesos para tratamiento de lodos. En la práctica, un sistema no necesariamente incluye todos los procesos indicados ni los sigue en ese orden, incluso pueden sobreponerse unos con otros.

La selección de un sistema de tratamiento adecuado se basa fundamentalmente en las características del lodo por tratar, en el tipo de utilización o disposición final y en todas aquellas restricciones con las que el sistema debe funcionar tales como instalaciones existentes, limitaciones económicas, limitaciones de espacio, condiciones ambientales, seguridad y sencillez en operación y manejo, etc.

2.2.1 Espesamiento

El espesamiento de lodos se lleva a cabo para incrementar la concentración de sólidos, logrando por consiguiente reducir de forma considerable su volumen. La figura 2.2 muestra que un lodo cuya concentración inicial de sólidos es de 1% y es espesado hasta 2% y 5% reducirá su volumen al 50% y 20% del original, respectivamente. El material resultante, aún debe ser fluido; muy raras veces se

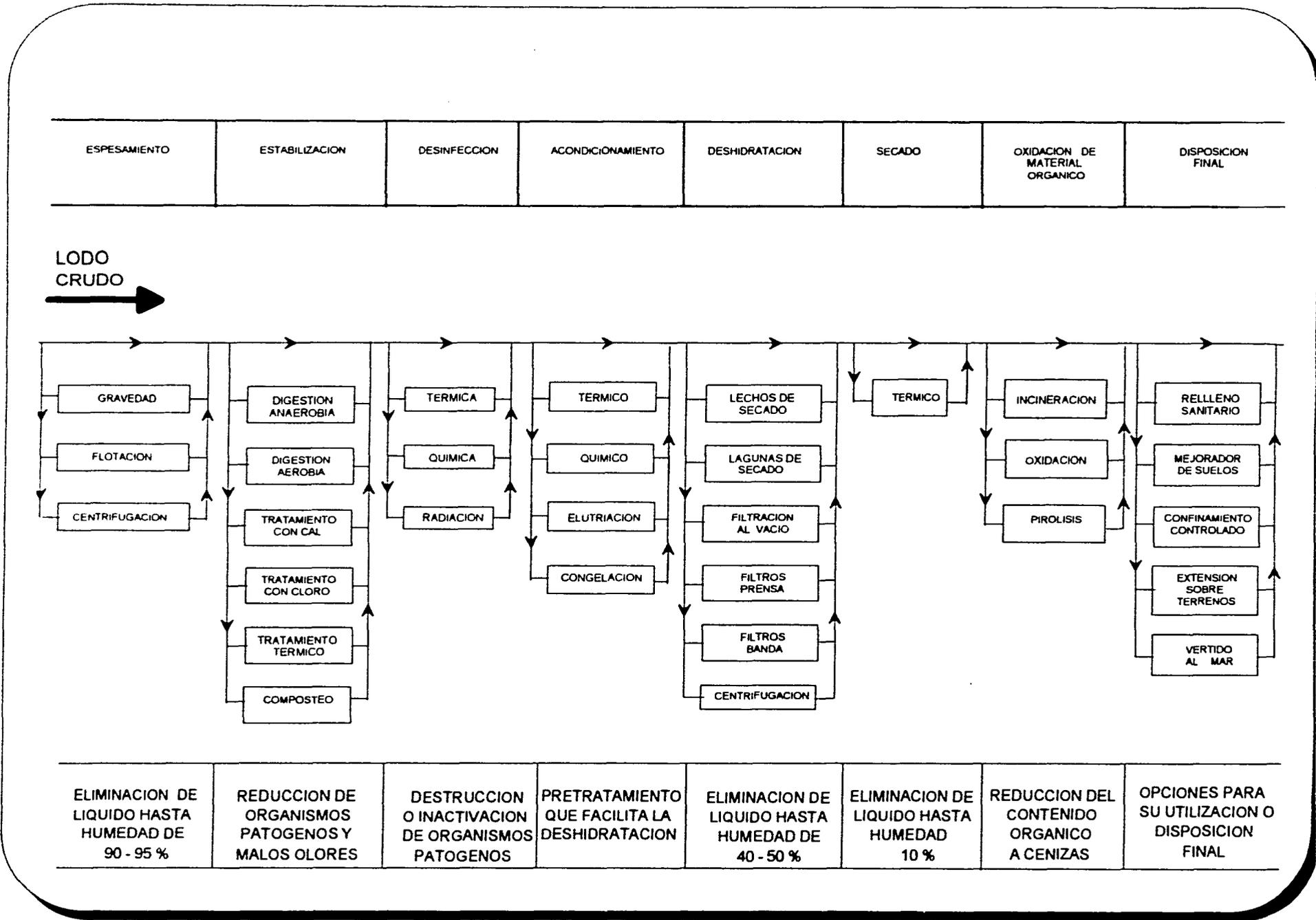


Fig. 2.1 Clasificación de sistemas para tratamiento de lodos y alternativas para su disposición final

desean obtener concentraciones de sólidos mayores a 10% o 12%, ya que estos lodos son viscosos y difíciles de bombear (Metcalf y Eddy, 1979).

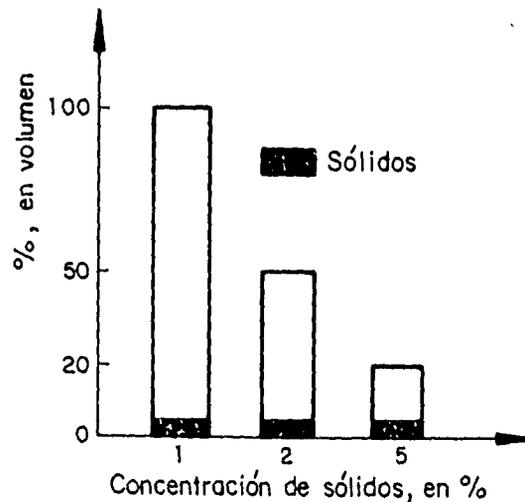


Fig. 2.2 Reducción de volumen con el espesamiento

Con objeto de disminuir los costos de las etapas subsecuentes, el espesamiento constituye generalmente el primer paso en el tratamiento de lodos. Dependiendo del sistema elegido, el espesamiento puede proporcionar además las siguientes ventajas: mezclado, almacenaje, remoción de arena y uniformidad del flujo entre otras.

Los métodos más comunes de espesamiento son:

- Por gravedad;
- por flotación y
- por centrifugación.

En general, el espesamiento por gravedad se usa para lodos primarios o mezclas de lodos primarios y secundarios, mientras que flotación y centrifugación se aplican casi exclusivamente a lodos secundarios.

2.2.1.1 Espesamiento por gravedad

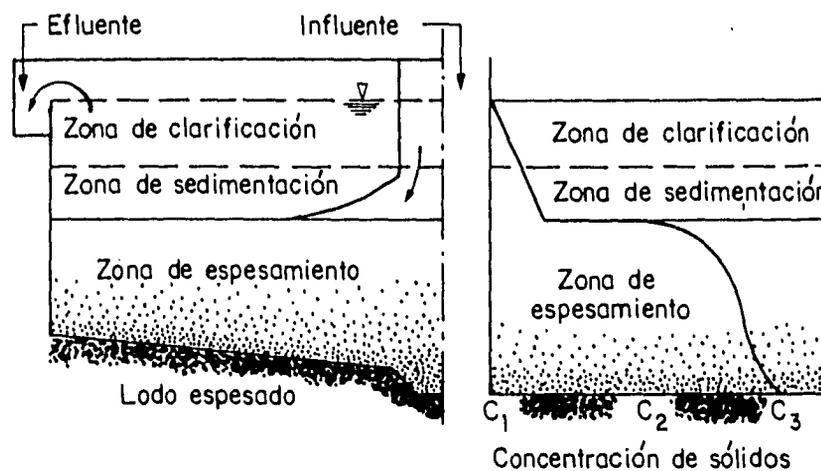
El espesamiento por gravedad puede llevarse a cabo en el tanque de sedimentación primaria o en un espesador por separado. Tomando en cuenta que el objetivo principal de la sedimentación es la eliminación de sólidos suspendidos, el mejor efecto se alcanza cuando los lodos se extraen rápidamente del tanque. Por otro lado, la finalidad de espesar los lodos es producir un lodo tan concentrado como sea posible y, el espesamiento por separado ofrece la ventaja de apartar físicamente un proceso del otro, de modo que ambos puedan operar en condiciones óptimas.

La figura 2.3 muestra el perfil de concentraciones de sólidos en un espesador por gravedad de operación continua. Este funciona de manera similar a un tanque circular de sedimentación; los lodos se alimentan por el centro, se distribuyen radialmente en la zona de sedimentación y fluyen parcialmente hacia el fondo del tanque donde se concentran y espesan por efecto de la presión hidrostática y por el peso de los sólidos que se acumulan. El sobrenadante sale por los vertederos a nivel de superficie y generalmente se regresa a la sección de tratamiento secundario de líquido.

Se llega a presentar el caso de que, durante el tratamiento biológico, principalmente en el sistema de lodos activados, se producen lodos con tan bajas concentraciones de sólidos que, su densidad relativa es prácticamente la misma que la del agua, lo cual dificulta apreciablemente su sedimentación y espesamiento subsecuentemente. Sin embargo, actualmente se han diseñado ya algunos sistemas para el espesamiento por gravedad de lodos activados que prevén ese problema (Billmeir, 1988; Cheremisinoff, 1988).

Algunas de las ventajas del espesamiento por gravedad, comparado con otras formas de espesamiento, son las siguientes (EPA, 1979):

- Proporciona mayor capacidad para almacenamiento de lodos;
- su operación es la más sencilla;
- requiere menos personal capacitado;
- sus costos de operación y mantenimiento son inferiores.



C_1 = Concentración de sólidos en el influente
 C_2 = Concentración de sólidos al iniciar el espesamiento
 C_3 = Concentración de sólidos en el lodo espesado

Fig. 2.3 Perfil de concentraciones de lodos en un espesador por gravedad.

Entre las desventajas principales se consideran las siguientes:

- Requiere mayor extensión de terreno;
- puede producir malos olores;
- en caso de lodos muy diluidos, puede resultar poco eficiente.

2.2.1.2 Espesamiento por flotación con aire disuelto

En los casos en que el espesamiento por gravedad resulta poco eficiente, la flotación se ha empleado exitosamente para el espesamiento de lodos, aunque con mayores problemas técnicos y operacionales (Preiss, 1988).

En el espesamiento por flotación se utilizan diminutas burbujas de aire que quedan atrapadas en las partículas sólidas. La fuerza ascendente del conjunto partícula de lodos y burbuja de aire hace que las partículas floten, concentrándose en la superficie.

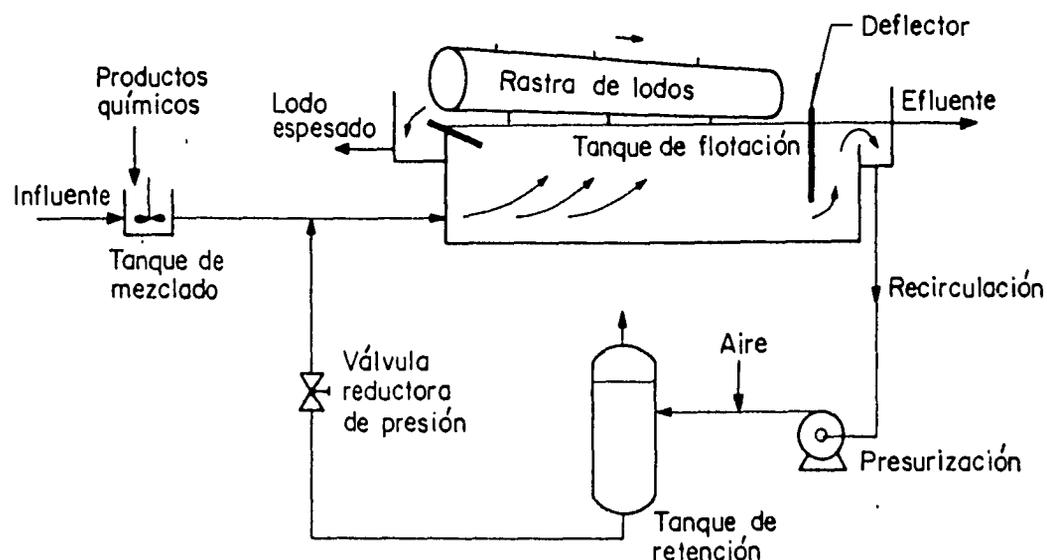


Fig 2.4 Espesador por flotación con recirculación

El aire bajo presión de varias atmósferas se mezcla con el lodo, ya sea con la corriente de alimentación o con la recirculación, manteniéndolo durante varios minutos en un tanque de retención para dar tiempo a que el aire se disuelva. Se hace pasar entonces a través de una válvula reductora de presión para ser

descargado al tanque de flotación que opera a presión atmosférica (ver figura 2.4). El aire deja de estar en solución y se desprende en forma de burbujas.

La principal ventaja de la flotación sobre el espesamiento por gravedad es la facilidad para remover más rápida y completamente aquellas partículas que sedimentan lentamente. Sin embargo, este método es más costoso, principalmente por los gastos ocasionados para mantener el aire bajo presión. En la mayoría de los casos el espesamiento por flotación requiere acondicionamiento con productos químicos como coadyuvantes de la flotación (Metcalf y Eddy, 1979).

2.2.1.3 Espesamiento por centrifugación

La centrifugación constituye un medio eficiente para complementar la sedimentación y sustituir el espesamiento por gravedad. Se emplea tanto para el espesamiento, como para la deshidratación de lodos. En el primer caso, su uso está prácticamente restringido al espesamiento de lodos provenientes del sistema de lodos activados. Existen tres tipos de centrifugas apropiadas para espesar lodos: centrífuga de discos, centrífuga horizontal de transportador helicoidal o de tornillo y centrífuga de tazón (Metcalf y Eddy, 1979).

La centrífuga de transportador helicoidal es la más empleada en el tratamiento de lodos. La unidad central es un tambor montado en forma horizontal que contiene una hélice que gira a una velocidad ligeramente diferente a la del tambor. Los lodos son arrojados hacia las paredes por efecto de la fuerza centrífuga y son transportados por medio de la hélice hacia el extremo de descarga de la unidad. En la mayoría de los casos, el tambor está diseñado con un diámetro decreciente en el sentido de la trayectoria de los sólidos, creando una zona en donde los lodos pueden concentrarse un poco más (ver figura 2.5 a). Este equipo opera en forma continua con alta eficiencia.

La centrífuga de discos opera también en forma continua. Consiste de una unidad formada por una serie de discos ordenados verticalmente. Cada disco, actúa como una centrífuga de baja capacidad. El líquido se va clarificando gradualmente al

pasar entre los discos. Los sólidos se concentran en la periferia del tambor y se descargan a través de pequeños orificios (ver figura 2.5 b).

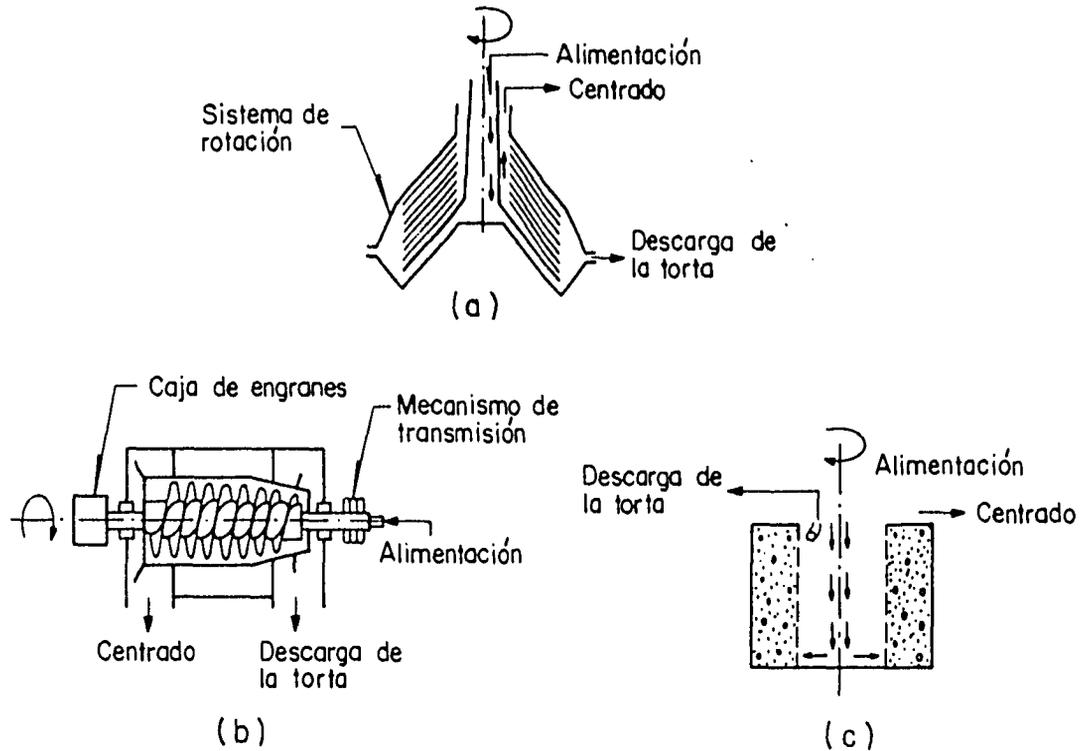


Fig. 2.5 Centrifugas empleadas para el espesamiento de lodos (a) centrífuga de transportador helicoidal, (b) centrífuga de discos, (c) centrífuga de tazón.

La centrífuga de tazón opera intermitentemente. En este sistema, el lodo se alimenta a un recipiente rotatorio montado verticalmente sobre una flecha; al girar éste los sólidos se acumulan en las paredes del recipiente y el agua sale por el centro. Cuando el equipo completa la separación, el tazón se detiene gradualmente y se procede a descargar la torta de lodo (ver figura 2.5 c).

A pesar de que el espesamiento por centrifugación proporciona algunas ventajas técnicas sobre los métodos anteriores, los altos costos por mantenimiento y consumo de energía pocas veces justifican su instalación. Para garantizar operación y mantenimiento adecuados, el equipo debe ser manejado por personal capacitado (Cheremisinoff, 1988).

2.2.2 Estabilización.

La estabilización de lodos es aquel proceso o serie de procesos que producen un lodo con características tales que su disposición final no dañe el medio ambiente ni cause cualquier tipo de desequilibrio ecológico. Para conseguirlo es indispensable reducir la actividad biológica o el contenido de organismos patógenos, eliminar sustancias tóxicas, olores desagradables, etc. Generalmente la estabilización mejora las condiciones del lodo para facilitar su deshidratación.

Los patógenos son organismos capaces de causar enfermedades en otros organismos "huésped". Un huésped puede ser una planta, animal o ser humano. Los patógenos se clasifican en tres amplias categorías: virus, bacterias y hongos. Los virus, bacterias y otros parásitos se encuentran presentes en todos los lodos de aguas residuales domésticas. Otros organismos tales como algunos hongos, larvas de moscas, nemátodos, etc., crecen en aquellos lodos que se almacenan por largos períodos de tiempo (Cheremisinoff, 1988).

Generalmente la estabilización también mejora las condiciones del lodo para facilitar su deshidratación.

Aunque el grado de estabilización en los lodos no puede ser medido por algún método estándar aceptado universalmente, existen varios parámetros que proporcionan una medida indirecta de sus características:

- Sólidos volátiles;
- DBO en el filtrado;
- incremento de DBO con el almacenaje;
- tasa de consumo de oxígeno;
- producción de gas;
- producción de ácidos volátiles;
- cambios de pH;
- contenido de ATP, ADN;
- actividad enzimática.

Algunos autores han combinado varios de estos parámetros para crear un índice de estabilización (Vesilind *et al*, 1986).

La tabla 2.6 presenta algunos de los procesos utilizados para lograr la estabilización en lodos y, de manera cualitativa, los efectos que causan en ellos.

TABLA 2.6 EFECTOS DE ALGUNOS PROCESOS DURANTE LA ESTABILIZACION DE LODOS (Vesilind *et al*, 1986).

Método	Efecto ^a			
	Reducción de olor	Destrucción de patógenos	Remoción de tóxicos	Mejoramiento en la deshidratación
Digestión anaerobia	+	+	+ ^b	+ ^c
Digestión aerobia	+	+	0	- ^c
Tratamiento con cal (Ca(OH) ₂)	+	+	+ ^d	+
Tratamiento con cal viva (CaO)	+	++	++ ^d	+
Composteo	+	+	0	NA
Lagunas de estabilización	0	+	0	+ ^c
Cloración	+	++	0	+
Radiación	0	++	0	0
Pasteurización	-	++	0	+
Secado térmico	++	++	0	NA
Incineración	++	++	0	NA

- a
- = efecto negativo,
 - 0 = no muy efectivo,
 - + = efectivo,
 - ++ = muy efectivo,
 - NA = No aplicable
- b Remoción en el sobrenadante
- c Solo en lechos de arena
- d Reducción de metales solubles

2.2.2.1 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es la degradación biológica de sustancias orgánicas complejas en ausencia de oxígeno atmosférico. Durante estas reacciones se libera energía y gran parte de la materia orgánica es convertida a metano, dióxido de carbono y agua. La producción de metano ha hecho que este proceso sea muy atractivo en países donde los energéticos son caros (Fisher, 1983).

El proceso depende de la acción de microorganismos, generalmente clasificados como productores de ácidos (acidogénicos) y productores de metano (metanogénicos). Estos últimos son de primordial importancia en el tratamiento de aguas residuales y, para asegurar su sobrevivencia en este proceso deben controlarse rigurosamente parámetros como temperatura, alcalinidad y pH, y asegurar un tiempo de retención suficiente para que la digestión se lleve a cabo. La figura 2.6 muestra de forma simplificada los procesos microbiológicos y transformaciones bioquímicas de la digestión anaerobia.

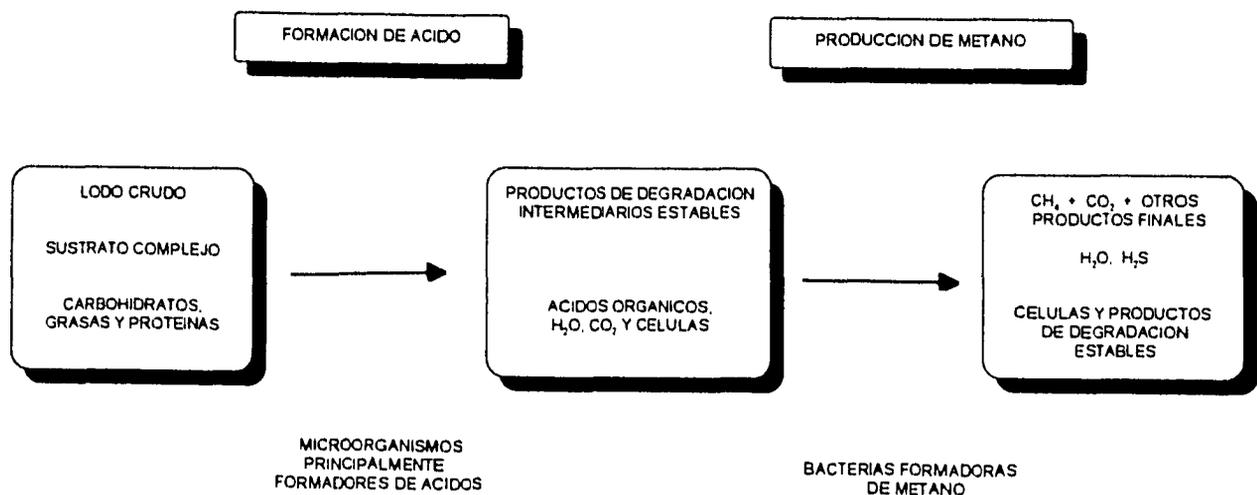


Fig. 2.6 Diagrama simplificado de los procesos y transformaciones que se llevan a cabo durante la digestión anaerobia de lodos.

La digestión anaerobia de lodos puede llevarse a cabo en digestores de carga convencional o digestores de alta tasa. La digestión convencional se efectúa en un solo tanque sin mezclado (una etapa), en el cual se llevan a cabo simultáneamente digestión, espesamiento del lodo y separación del sobrenadante. La digestión también puede realizarse en dos etapas: se emplea un primer tanque equipado con dispositivos para el calentamiento y mezclado del lodo en el que se lleva a cabo la digestión, y un segundo tanque que se usa para el almacenamiento y concentración del lodo digerido y para la separación del sobrenadante (ver figura 2.7).

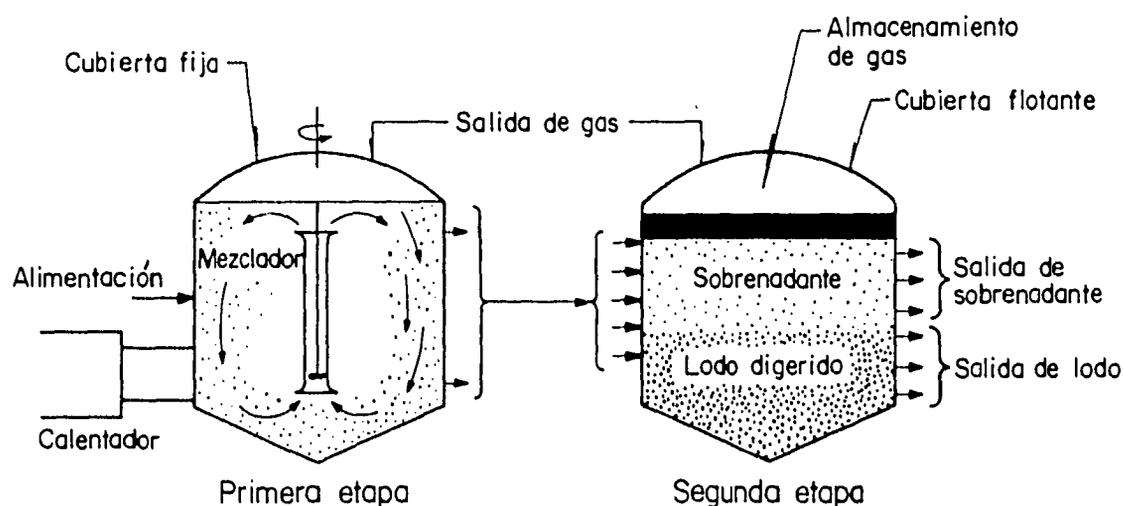


Fig. 2.7 Esquema de un proceso de digestión anaerobia en dos etapas

En un digestor de alta tasa la carga de sólidos es mucho mayor que en un proceso de digestión convencional. El contenido del digestor se mezcla mediante recirculación del gas o por medio de mezcladores mecánicos y se calienta hasta 35-38°C para conseguir un rendimiento más alto. El equipo de mezclado deberá

tener gran capacidad y llegar hasta el fondo del tanque; las tuberías de gas deberán manejar mayores caudales de gases; las salidas para la extracción del lodo sustituyen las salidas del sobrenadante y, por último, el tanque es más profundo para facilitar el proceso de mezclado.

El gas producido en el proceso de digestión anaerobia está compuesto aproximadamente por una mezcla 65-70% metano, 30-35% dióxido de carbono y trazas de sulfuro de hidrógeno (Qasim, 1985). Es un excelente combustible y casi siempre se utiliza para el calentamiento del digestor.

La digestión anaerobia ofrece varias ventajas sobre otros métodos de estabilización:

- La producción de metano, en la mayoría de los casos, genera energía en cantidades superiores a la requerida para mezclado y calentamiento;
- durante el proceso se transforman en gases entre 25 y 45% de los sólidos del lodo crudo. Esto hace que la masa total se reduzca de forma importante;
- el lodo digerido de forma anaerobia contiene nutrientes y materia orgánica que permiten su disposición final como mejorador de suelos;
- el proceso destruye la mayor cantidad de los organismos patógenos presentes en el lodo.

Algunas desventajas importantes de este proceso, que pueden resultar importantes en la elección del método de estabilización, son las siguientes:

- Los costos capitales son altos. Se requieren tanques muy grandes, cerrados y que deben estar equipados con sistemas para la alimentación, calentamiento, mezclado, etc.;
- los microorganismos involucrados en la descomposición anaerobia son muy sensibles a pequeños cambios de pH y temperatura y a la influencia de agentes inhibidores o tóxicos;

- el sobrenadante de los digestores generalmente contienen altas concentraciones de nitrógeno, DBO y sólidos suspendidos. Cuando este líquido es reciclado a la sección de tratamiento de secundario, puede ocasionar variaciones importantes que finalmente generen un efluente de mala calidad;
- debido a que la rapidez de crecimiento de las bacterias que llevan a cabo la digestión anaerobia es lenta, se requieren grandes reactores para proporcionar 15 o 30 días de tiempo de permanencia de los lodos. Esto también limita la rapidez de respuesta del proceso al hacer ajustes por cambios en la composición de los lodos u otros factores ambientales.

2.2.2.2 Digestión aerobia

La digestión aerobia es aquella que utiliza oxígeno para la degradación de residuos biológicos en un tanque abierto o cerrado, permitiendo el suficiente tiempo de contacto entre los organismos aerobios y la materia orgánica biodegradable.

Aparentemente la digestión aerobia de lodos es un proceso parecido al de lodos activados, ya que en ambos casos la materia orgánica biodegradable sufre una oxidación ocasionada por reacciones bioquímicas. Sin embargo, en la digestión aerobia, cuando el sustrato exógeno se ha agotado, los microorganismos comienzan a consumir sus reservas internas (sustrato endógeno) a fin de obtener energía suficiente para mantener las reacciones de supervivencia. Cuando esto ocurre, se dice que los microorganismos se encuentran en su "fase endógena". Las ecuaciones 2.12 y 2.13 ilustran la oxidación de sustratos exógenos (materia orgánica contaminante) y la oxidación del material orgánico endógeno, respectivamente. Cabe señalar que solo del 75 al 80% del material celular puede ser oxidado por medios bioquímicos, ya que el material restante lo constituyen compuestos no biodegradables (Metcalf y Eddy, 1979).



La digestión aerobia se emplea para la estabilización de lodos primarios, secundarios o mezclas, principalmente de plantas pequeñas (Vesilind *et al*, 1986). Algunas de las ventajas que se le atribuyen a este procesos son:

- Su operación es relativamente sencilla, sobre todo comparada con la de sistemas anaerobios;
- forma un producto final inodoro parecido al humus y biológicamente estable;
- no genera malos olores;
- produce un sobrenadante con bajas concentraciones de DBO, sólidos suspendidos y nitrógeno amoniacal;
- la reducción de sólidos volátiles es aproximadamente igual a la obtenida por vía anaerobia;
- reduce de forma importante el contenido de patógenos en el lodo;
- la inversión inicial es generalmente menor que la requerida para la digestión anaerobia, principalmente cuando se trata de plantas que operan con caudales menores de 220 l/s (EPA, 1979).

Algunas de las desventajas más importantes son:

- Generalmente, el lodo producido tiene características tales que su deshidratación por medios mecánicos puede ser deficiente;
- algunas variables, tales como temperatura, localización y tipo de material del tanque, pueden influir en el funcionamiento del proceso (EPA, 1979);
- los costos de operación son altos debido al consumo de energía necesario para llevar a cabo la aeración y el mezclado. Se requieren aproximadamente 50 a 100 kwh/m³ de lodo tratado contra 5 kwh/m³ de lodo tratado en el tratamiento anaerobio (Fisher, 1983).

En un proceso convencional de digestión aerobia, operando a temperatura ambiente (mesofílico), se requieren entre 10 y 50 días de aeración para conseguir reducciones considerables en los sólidos volátiles (Bruce y Fisher, 1984), pero los tiempos de retención comunes para lograr lodos estables van desde 10 hasta 15 días. Aunque el lodo puede bombearse al digester directamente del sedimentador secundario, se recomienda su espesamiento para reducir el volumen del digester.

La digestión aerobia autotérmica, se basa en la generación de calor por parte de los microorganismos presentes en el digester; requiere necesariamente que el lodo sea espesado previamente para aumentar la carga de sólidos al digester. De esta forma es posible alcanzar temperaturas hasta de 70°C, dependiendo de las condiciones del lodo (Bruce y Fisher, 1984). Al aumentar la temperatura el proceso se acelera notablemente y presenta otras ventajas sobre el digester convencional: requiere menor volumen, produce un lodo desinfectado por pasteurización, requiere entre 30 y 40% menos oxígeno que el proceso mesofílico y mejora un poco la separación sólido-líquido, ya que disminuye la viscosidad del líquido (Matsh y Drnevich, 1977; Surucu *et al*, 1976). Sin embargo, la operación de este proceso debe llevarse a cabo con un control riguroso de los parámetros involucrados debido a la sensibilidad de los microorganismos a cambios ambientales. Además, esta forma de operación encarece el sistema porque generalmente se requieren tanques aislados térmicamente, mayor potencia en los dispositivos para el mezclado y muy alta eficiencia en el sistema de aeración, el cual preferentemente debe trabajar con oxígeno puro en vez de aire (Morgan *et al*, 1983).

2.2.2.3 Tratamiento con cal

La estabilización de lodos por medio del tratamiento con cal es un proceso relativamente simple. Se aplica cal, normalmente en forma hidratada, en dosis suficiente para elevar el pH hasta un valor entre 11 y 12, manteniéndolo durante algunos días (Paulsrud y Eikum, 1983). El medio fuertemente alcalino es capaz de destruir a los organismos patógenos y a otros presentes en el lodo, o cuando menos de inhibir significativamente sus funciones metabólicas. Paulsrud (1975), informa que aplicando cal a lodos de aguas residuales domésticas, hasta un pH

superior a 12 y manteniéndolo durante 3 horas, obtuvo una destrucción de patógenos, comparable con la esperada por digestión anaerobia.

La aplicación de cal también reduce la emisión de sulfuros volátiles y ácidos grasos, disminuyendo considerablemente los malos olores. Usualmente se aplica una dosis entre 150 y 200 g Ca(OH)_2 por kg de sólido seco (Bruce y Fisher, 1984).

Otra modalidad del proceso consiste en la aplicación de cal viva (CaO) a la torta de lodo una vez deshidratado parcialmente. La hidratación de la cal al mezclarse con el lodo (ec. 2.14) tiene dos efectos principales: primero, parte del agua se enlaza químicamente al calcio, por lo que la deshidratación del lodo es más efectiva; segundo, la combinación de calor y pH elevado constituyen una forma muy efectiva para la destrucción de patógenos.



En este caso, es esencial proporcionar un mezclado eficiente y continuo para asegurar que la temperatura sea uniforme, por lo cual el consumo de energía para mezclado se eleva considerablemente.

Las ventajas principales de la estabilización con cal son sus bajos costos y la simplicidad de operación, además de que el contenido de cal en el lodo lo hace atractivo para usos en la agricultura y para disponerlo en relleno sanitario.

Si la dosificación no es suficiente o si los lodos se almacenan durante muchos días se pueden presentar malos olores, además de la deficiente eliminación de microorganismos patógenos. Si el pH se reduce por debajo de 10 los microorganismos recuperan de forma importante su actividad biológica.

2.2.2.4 Tratamiento con cloro

Este método se lleva a cabo aplicando dosis elevadas de cloro (aproximadamente 2000 mg/l) para efectuar una reacción de oxidación que elimina casi la totalidad de organismos patógenos (Vesilind, 1979).

La oxidación con cloro es una reacción rápida y se requieren materiales resistentes a la corrosión debido a que los lodos estabilizados de esta manera son muy ácidos. La acidez de los lodos interfiere con la acción de los agentes químicos empleados como acondicionadores para la filtración.

Aún cuando este proceso resultara económico, la formación de hidrocarburos clorados y cloroaminas hacen que la disposición final del lodo sea difícil, ya que no es recomendable su aplicación a suelos (Vesilind, 1979).

2.2.2.5 Composteo

El composteo es un proceso biológico controlado que favorece la descomposición de la materia orgánica. El producto final o composta en general puede ser manejado sin causar efectos desfavorables en el ambiente o puede ser aprovechado como mejorador de suelos en el cultivo de plantas que no están directamente relacionadas con las cadenas tróficas asociadas al hombre. El calor que se produce durante la descomposición de la materia orgánica puede alcanzar temperaturas letales para muchos de los patógenos contenidos en el lodo (Paulsrud y Eikum, 1983).

Se recomienda siempre mantener condiciones aerobias en el sistema para evitar malos olores y favorecer la transformación del carbono orgánico a dióxido de carbono y agua. Para lograrlo es indispensable proveer de suficiente oxígeno a los microorganismos por medio de agitación mecánica continua cuando el composteo

se lleva a cabo en un recipiente cerrado o por medio de sopladores de aire o agitación ocasional con palas cuando se efectúa en pilas abiertas. Esta segunda opción requiere que el lodo se mezcle con algún material de soporte como tierra o viruta de madera para incrementar su porosidad facilitando el paso del aire y para reducir el contenido de humedad de la mezcla (Vesilind *et al*, 1986).

El composteo comprende generalmente las siguientes etapas:

Preparación. Antes de iniciar el composteo es deseable que el lodo tenga un contenido de humedad entre 40 y 60% por lo que es indispensable que el lodo se deshidrate previamente en lechos o mediante algún sistema mecánico. Posteriormente, el lodo se mezcla con el agente de soporte o con desechos orgánicos sólidos en una proporción en peso aproximada de 1:2 (EPA, 1974).

Digestión. Este período se caracteriza por una descomposición exotérmica rápida de la materia orgánica durante la que se alcanzan temperaturas entre 46 y 57°C o mayores, suficientes para eliminar organismos patógenos. Comprende aproximadamente seis semanas si el composteo se lleva a cabo en pilas y entre 4 y 7 días si el sistema cuenta con aeración mecánica (EPA, 1974).

Estabilización. Durante esta etapa la velocidad de descomposición disminuye considerablemente y por ende la temperatura desciende también hasta llegar a temperatura ambiente, completándose así el proceso. Su duración aproximada es de dos semanas en composteo en pilas y entre una y dos semanas en sistemas con aeración mecánica.

El composteo es un proceso sencillo pero para que funcione adecuadamente es necesario mantener un cuidadoso control de la temperatura, el tiempo de digestión y sobre todo del contenido de humedad. El sistema debe contar con una red de drenes para coleccionar infiltraciones y con un medio eficiente de aeración. Este método es poco empleado para manejar grandes volúmenes de lodo.

2.2.2.6 Estabilización térmica.

Uno de los medios más conocidos para la destrucción de organismos patógenos es el calor, por lo que no es raro que se aplique para la estabilización y desinfección de lodos residuales, ya sea mediante pasteurización u oxidación a baja presión.

La pasteurización consiste en calentar el lodo a aproximadamente 70 °C durante 30 minutos. Es un proceso sumamente efectivo contra la mayoría de los parásitos presentes en lodos domésticos; sin embargo, no reduce los malos olores por lo que se recomienda llevarla a cabo asociada con algún método que elimine el problema (Havelaar, 1984).

TABLA 2.7 EFECTO DE LA TEMPERATURA Y TIEMPO SOBRE PATOGENOS TÍPICOS ENCONTRADOS EN LODOS DOMESTICOS (EPA, 1974).

Organismo	Temperatura (°C)				
	50	55	60	65	70
	minutos necesarios para su eliminación total				
<i>Entamoeba histolytica</i>	5	-	-	-	-
<i>Ascaris lumbricoides</i>	60	7	-	-	-
<i>Brucella abortus</i>	-	60	-	3	-
<i>Corynebacterium diphtheria</i>	-	45	-	-	4
<i>Salmonella typhosa</i>	-	-	30	-	4
<i>Escherichia coli</i>	-	-	30	-	5
<i>Micrococcus pyrogene</i>	-	-	-	-	20
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	-	-	-	-	20
Estreptococos fecales	-	-	-	-	60
Coliformes fecales	-	-	-	-	60
Virus	-	-	-	-	25

- No existen datos

La tabla 2.7 presenta el efecto de la pasteurización sobre algunos microorganismos comunes en lodos domésticos a diferentes combinaciones de temperatura y tiempo. Como puede observarse, la eficiencia de la estabilización y desinfección térmica es alta; sin embargo sus costos son significativamente mayores que en otros métodos alternativos.

El lodo pasteurizado es altamente susceptible a reinfectarse, por lo que durante el proceso y manejo posterior del lodo se deben extremar precauciones y operar bajo control riguroso. Debe evitarse todo contacto entre el lodo desinfectado y el lodo crudo, manejándolos en tuberías por separado, emplearse tanques de almacenamiento cerrados, etc.

El proceso de oxidación a baja presión se lleva a cabo a temperaturas 180 y 200°C, manteniendo la presión entre 12.5 y 14.7 kg/cm² durante 20 min (EPA, 1974). Los microorganismos presentes en el lodo mueren por efecto de las altas temperaturas que degradan las estructuras celulares. Este proceso es empleado también para facilitar la deshidratación del lodo (ver sección 2.2.4.2).

2.2.3 Desinfección

La desinfección de lodos se lleva a cabo con la intención de destruir o inactivar a los organismos patógenos. Aunque su número se reduce considerablemente mediante estabilización, algunos de ellos, particularmente parásitos (nemátodos), pueden sobrevivir a dicho proceso. Es un paso importante cuando los lodos se utilizan como mejorador de suelos donde los patógenos pueden entrar en contacto directo con el hombre. Puede llevarse a cabo mediante la aplicación de productos químicos, tratamiento térmico o por medio de radiación de alta energía.

2.2.3.1 Desinfección química

El agente químico más empleado y quizá el más conveniente y de más fácil acceso es la cal. La mayoría de las bacterias presentes en los lodos domésticos (por ejemplo coliformes y salmonella) son destruidos rápidamente a valores de pH sobre 9 o 10. La desinfección con cal resulta efectiva si se logra un mezclado eficiente y se alcanzan valores de pH entre 11.5 y 12.5 (Havelaar, 1984). Godfree *et al*

(1984) informa que para alcanzar dicho pH se requieren aproximadamente de 5 a 7 kg de cal/m³ de lodo, mientras que la WPCF (1984) indica que la dosis adecuada depende de la concentración de sólidos en el lodo y recomienda entre 0.12 y 0.30 kg de CaO por kg de sólidos secos en el lodo.

Otra opción, aunque poco empleada, consiste en la aplicación de grandes cantidades de cloro. Este método es poco efectivo contra quistes y huevecillos de parásitos (Cheremisinoff, 1988).

2.2.3.2 Desinfección térmica

La pasteurización es uno de los procesos térmicos más empleados con fines desinfectantes, aunque también se puede llevar a cabo mediante oxidación a baja presión. Ambos métodos se describen en la sección 2.2.2.6.

2.2.3.3 Desinfección mediante radiación

Una alternativa más para la desinfección de lodos es la radiación de alta energía en forma de rayos beta y gama. Al penetrar éstos en el lodo inducen ionización secundaria, formando compuestos oxidantes y reductores que destruyen a los patógenos. Sedláček *et al* (1984) informan que una dosis de 3 kGy es suficiente para reducir considerablemente la concentración de *salmonella sp.* e indica que el lodo difícilmente podrá re infectarse.

Por razones económicas y de seguridad el empleo de este método no ha sido suficientemente difundido. Se recomienda radiar al lodo después de la deshidratación o con la concentración de sólidos más alta posible, ya que la radiación que absorbe el agua se considera una pérdida.

2.2.4 Acondicionamiento para la deshidratación

Para facilitar la eliminación de agua mediante los procesos de deshidratación se requiere de un tratamiento previo, llamado acondicionamiento, que ayuda a alcanzar la concentración de sólidos necesaria para la disposición final del lodo. Su función es proporcionar al lodo una estructura suficientemente rígida para permitir que el agua drene más fácilmente. Las características sobre las cuales actúa el acondicionamiento son básicamente el tamaño y distribución de partículas en el lodo, carga superficial y grado de hidratación e interacción entre partículas (EPA, 1979). Puede llevarse a cabo por medios físicos o químicos.

Algunos métodos para el acondicionamiento de lodos son:

- Adición de productos químicos: cal, sales de fierro, sales de aluminio o polielectrolitos;
- tratamiento térmico;
- elutriación después de la digestión;
- congelación.

2.2.4.1 Acondicionamiento químico

El acondicionamiento químico de lodos se puede lograr añadiendo compuestos orgánicos o inorgánicos antes de llevar a cabo la deshidratación.

El acondicionamiento añadiendo compuestos inorgánicos se emplea generalmente cuando se desea deshidratar lodos crudos o digeridos en filtros prensa o al vacío. Normalmente se utiliza una mezcla de cal y sales de fierro o aluminio (sulfato ferroso, sulfato férrico, cloruro férrico o sulfato de aluminio), las cuales producen iones cargados positivamente que reaccionan con los iones negativos en el lodo, neutralizándolos y permitiendo la formación de agregados más grandes que sedimentan fácilmente y pueden ser rápidamente deshidratados. El cloruro férrico

reacciona con los bicarbonatos del lodo produciendo hidróxidos que actúan como floculantes. La cal tiene un ligero efecto deshidratante, pero su principal propósito es elevar el pH para reducir malos olores.

Los polielectrolitos son compuestos orgánicos de cadenas largas y altos pesos moleculares, tal como son los derivados del almidón, la celulosa, materiales proteicos y muchos otros que se producen en forma sintética. A lo largo de sus cadenas tienen grupos cargados positiva o negativamente (polielectrolitos catiónicos y aniónicos respectivamente). Estos compuestos se usan en el acondicionamiento de lodos para desorber agua de la superficie de las partículas sólidas, neutralizar cargas y para actuar como un puente entre partículas, facilitando así su aglomeración. Su uso ha hecho posible la introducción de dos métodos de deshidratación: centrifugación y deshidratación con filtros bandas (Cornier *et al*, 1983).

2.2.4.2 Acondicionamiento térmico

Este proceso se lleva a cabo calentando el lodo a temperaturas entre 175 y 230°C durante 15 a 40 min aproximadamente, en recipientes que soportan presiones de 17.5 a 28 kg/cm² (EPA, 1979). A estas condiciones mueren los organismos presentes en el lodo debido a la degradación de las estructuras celulares. El efecto sobre la deshidratación es drástico ya que la fase líquida se puede separar muy fácilmente por filtración o aún en lechos de arena (Eden, 1983).

Una modificación del proceso consiste en aplicar aire comprimido al lodo antes de su entrada a la cámara de acondicionamiento para favorecer la oxidación de la materia orgánica.

Algunas ventajas del acondicionamiento térmico de lodos son (Spinosa *et al*, 1985):

- Mejora considerablemente el espesamiento y deshidratación;
- reducción de sólidos y organismo patógenos;
- estabiliza el lodo aún en presencia de sustancias tóxicas;

- es poco sensible a cambios en la composición del lodo;
- es posible recuperar metales pesados.

El mismo autor señala las siguientes desventajas:

- Altos costos capitales y de operación;
- producción de una corriente gaseosa con olores indeseables;
- producción de un sobrenadante con altas concentraciones de material orgánico, nitrógeno amoniacal y color

2.2.4.3 Elutriación

La elutriación es un proceso físico por medio del cual los lodos digeridos de forma anaerobia se lavan para eliminar compuestos amínicos o amoniacales que se encuentren en cantidades excesivas. Este proceso no mejora las características del lodo para ser deshidratado pero reduce la demanda de productos químicos para neutralizar las cargas negativas en el lodo y subsecuentemente facilita su coagulación y sedimentación; se le clasifica como pretratamiento de la coagulación química. Se lleva a cabo mezclando los lodos con agua o con efluente de la planta durante un período de tiempo corto, a menudo inferior a 20 segundos, por medio de agitación mecánica o por medio de aire disuelto. Entonces se deja sedimentar y el sobrenadante se regresa a la sección de tratamiento de líquido.

Los costos de la elutriación deben justificarse con la economía resultante de la disminución de los costos por acondicionamiento con productos químicos.

2.2.4.4 Congelación

En algunas regiones frías del mundo se ha observado que si se permite que el lodo se congele en lechos de secado durante el invierno, la deshidratación se acelera y

facilita notablemente cuando llega la época de deshielo. Algunas pruebas de laboratorio han demostrado que la congelación previa disminuye la resistencia del lodo a la filtración. Al formarse cristales de hielo se produce la separación del agua y posteriormente se provoca la aglomeración de los sólidos en gránulos compactos (Vesilind, 1979). Se han hecho estudios congelando el lodo en tanques o poniéndolo en contacto con algún refrigerante; sin embargo, los altos costos de operación y mantenimiento no justifican la instalación de este sistema, excepto en lugares donde la congelación se lleve a cabo de manera natural (Eden, 1983).

2.2.5 Deshidratación

El objetivo principal de la deshidratación es eliminar tanta agua del lodo como sea posible para producir un material no fluido cuya concentración de sólidos sea significativamente más alta que en un lodo espesado. El proceso adecuado se selecciona principalmente por los requisitos de la etapas subsecuentes de tratamiento o de la disposición final.

La deshidratación de lodos se puede llevar a cabo por medios mecánicos o por métodos en los cuales el movimiento del agua es controlado por fuerzas naturales.

La filtración es una operación unitaria en la que los sólidos se apartan físicamente de una corriente líquida al hacerla pasar a través de un lecho o medio poroso. En los diferentes sistemas de filtración se aplica una fuerza, ya sea vacío, presión, gravedad o fuerza centrífuga, para hacer pasar solamente el agua a través del medio filtrante.

Los procesos mecánicos más utilizados para la deshidratación de lodos incluyen filtración al vacío, centrifugación, filtros prensa y filtros de bandas horizontales. Estos procesos se recomiendan cuando no se dispone de terreno suficiente o se tienen condiciones ambientales adversas.

Los métodos no mecánicos se basan en la filtración y evaporación del agua. Son sistemas menos complejos y más fáciles de operar que los sistemas mecánicos;

consumen menos energía pero requieren mayores extensiones de terreno y más trabajo de operación, principalmente para levantar la torta de lodo. Se recomiendan únicamente cuando se trata de pequeñas poblaciones (menos de 20,000 habitantes) cuyas instalaciones para tratamiento de aguas residuales operen con caudales máximos de 7,500 m³/d y se encuentren en lugares con climas áridos o semiáridos (EPA, 1987). Entre estos procesos se encuentran los lechos de secado y las lagunas de lodos.

2.2.5.1 Lechos de Secado

Los lechos de secado, principalmente lechos de arena, son el sistema más común y antiguo de los métodos no mecánicos para la deshidratación de lodos. El proceso se lleva a cabo permitiendo el drenado del agua por gravedad y su evaporación hasta alcanzar la concentración de sólidos deseada. La figura 2.8 muestra un corte de un lecho de arena. Las paredes laterales pueden construirse de concreto reforzado, cemento, placas de concreto o mampostería. Se recomienda una profundidad mínima de arena entre 25 y 30 cm, aunque en algunos casos se puede elevar a 45 cm para prolongar la vida del lecho (EPA, 1987).

Sobre la cama de arena limpia se permite la entrada del lodo hasta alcanzar un espesor entre 20 y 30. El período de tiempo entre su aplicación y su remoción varía entre 20 y 75 días, dependiendo principalmente de las velocidades de drenado y evaporación y de la naturaleza del lodo; es decir, si fue previamente acondicionado, el tiempo se puede reducir hasta en un 50% y se podrá aplicar en una capa más gruesa (Ramalho, 1983).

La concentración de sólidos requerida en la torta de lodo depende de los requisitos técnicos o de reglamentación para su disposición o utilización final. Si no se deben cubrir requisitos especiales, una concentración entre 25 y 30% de sólidos es adecuada para poder levantar la torta del lecho fácilmente (EPA, 1979).

El costo de la construcción, el costo de extraer el lodo y de sustituir la arena, así como la necesidad de una gran superficie, imposibilitan el uso de los lechos de arena en grandes municipios.

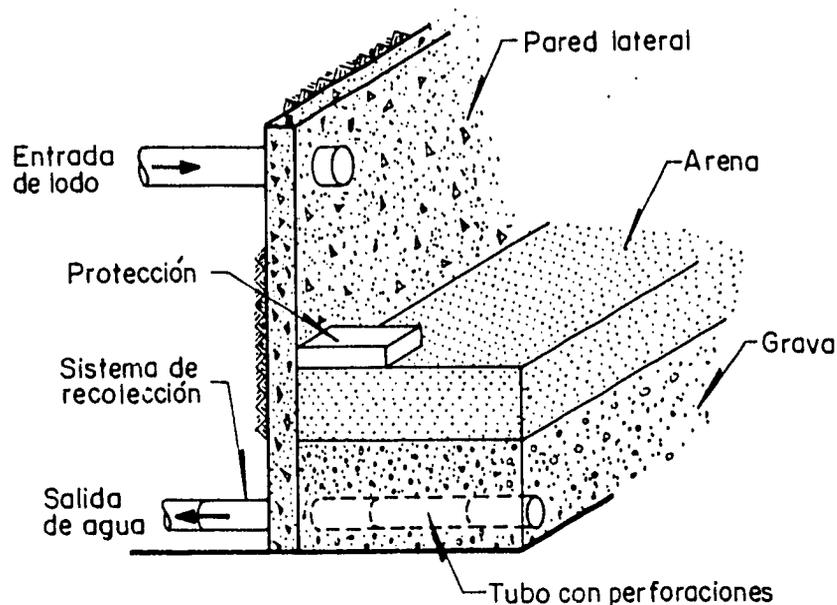


Fig. 2.8 Corte de un lecho de arena típico

2.2.5.2 Lagunas de secado

Las lagunas de secado de lodos consisten de un estanque poco profundo, limitado por diques de tierra de 0.7 a 1.4 m de altura, que se llenan con el lodo permitiendo su sedimentación (Qasim, 1985). El sobrenadante es decantado y puede regresarse a la planta. El tiempo de secado del lodo depende de las condiciones ambientales y de la profundidad del lodo aplicado. Generalmente se requieren de 3 a 6 meses para alcanzar una concentración entre 20 y 40% de sólidos en la torta de lodo (Qasim, 1985). La duración de un ciclo completo del proceso, que incluye desde el bombear el lodo a la laguna hasta las operaciones de mantenimiento una

vez que ésta ha sido vaciada, oscila entre menos de uno y hasta tres años. La torta de lodo se levanta y extrae por medio de equipo mecánico.

2.2.5.3 Filtración al vacío

Este sistema fue el método mecánico más común para la deshidratación de lodos de aguas residuales hasta mediados de los años setenta. Desde entonces ha tenido poco desarrollo y ha sido desplazado por otros sistemas, principalmente filtros prensa y centrifugas (EPA, 1987).

La unidad central de un filtro rotatorio al vacío es un tambor cilíndrico perforado que gira lentamente sobre un eje horizontal. Sobre la superficie externa del tambor se localiza el medio filtrante en forma una banda continua que puede ser de telas naturales o sintéticas, o bien de mallas de acero inoxidable. Durante el movimiento, aproximadamente el 25% del área del cilindro queda sumergida el lodo previamente acondicionado contenido en un tanque. Como muestra la figura 2.9, el tambor pasa sucesivamente por tres zonas de operación. La sección sumergida en el tanque es la zona de formación de la torta: en ella, el vacío aplicado dentro del cilindro succiona el líquido a través del medio filtrante, obligando a las partículas sólidas a permanecer sobre la superficie. La zona de secado de la torta, aproximadamente de 40 a 60% se la superficie del cilindro, empieza cuando éste emerge del lodo y termina en la zona de descarga de la torta. En esta parte el lodo se desprende de la banda debido a un cambio brusco de dirección del medio filtrante al pasar alrededor de un rodillo satélite (EPA, 1987).

Los parámetros de diseño más importantes para filtros rotatorios al vacío incluyen las características del lodo acondicionado, tiempo de formación de la torta, viscosidad, vacío aplicado, resistencia específica de la torta de lodo, tipo de medio filtrante y rendimiento de filtración.

Aún cuando los filtros rotatorios de vacío son mecánicamente complejos, su operación es muy fácil de entender ya que las zonas de formación y descarga de la torta son claramente visibles. No requieren operadores altamente capacitados.

Una ventaja adicional de este sistema es que puede operar aún cuando la dosis de acondicionador químico no sea la óptima (EPA, 1987).

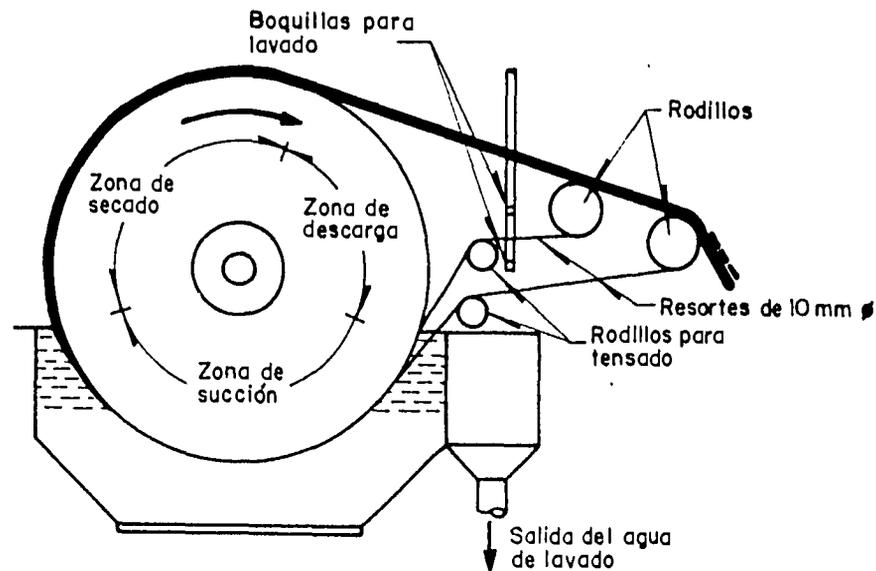


Fig. 2.9 Corte de un filtro rotatorio al vacío

2.2.5.4 Filtros prensa

Existen diferentes tipos de filtros prensa. Uno de los más empleados para la deshidratación de lodos es el filtro prensa de marco y placas. Está compuesto por marcos rectangulares prensados entre dos placas cubiertas con tela filtrante (ver figura 2.10). Los marcos, la tela y las placas se encuentran alternados en pilas horizontales, formando una serie de cavidades de paredes porosas. La unidad tiene un extremo fijo y uno móvil, en el que se aplica presión por medio de un

mecanismo hidráulico para mantener las placas y marcos prensados durante el período de filtración.

El lodo, previamente acondicionado, se alimenta al espacio formado entre las placas. Se aplica presión entre 4 y 14 kg/cm² durante 1 a 3 horas, forzando el paso del líquido a través de la tela filtrante y de los orificios de salida de las placas. El espesor de la torta de lodo varía entre 2.5 y 3.5 cm y el contenido de humedad entre 55 y 70% (Metcalf y Eddy, 1979). El tiempo necesario para completar un ciclo de filtración comprende el tiempo requerido para llenar la prensa, el tiempo que el sistema se mantiene a presión, el tiempo requerido para lavar y descargar la torta y el tiempo requerido para cerrar la prensa.

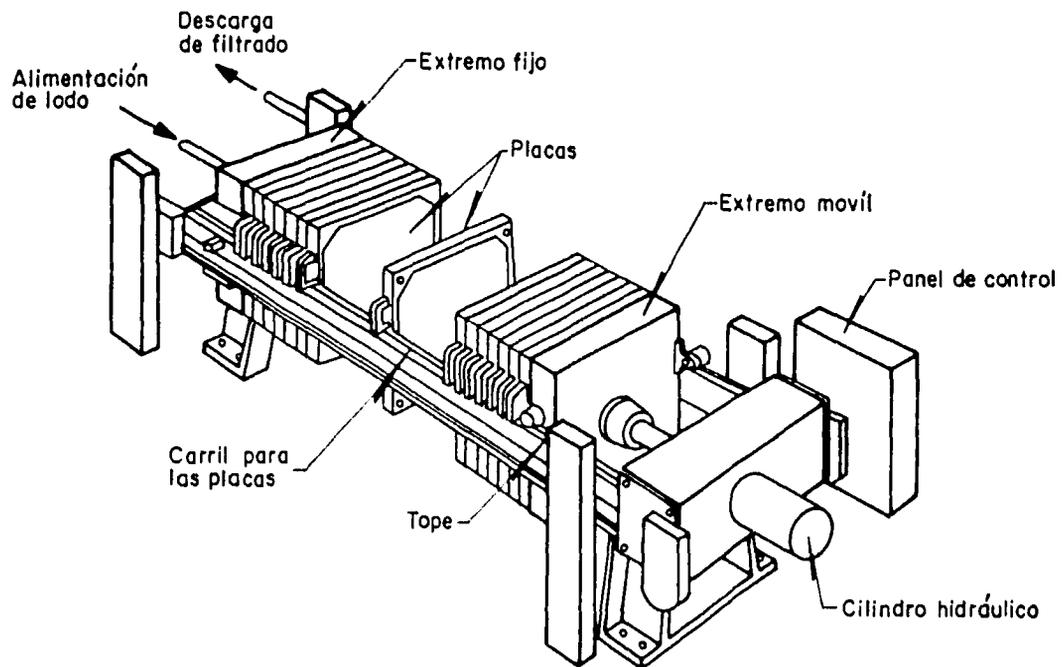


Fig. 2.10 Esquema de un filtro prensa de marco y placas

Otro tipo de filtro prensa desarrollado recientemente es el filtro prensa de diafragma o de volumen variable (EPA, 1987). Es similar al filtro prensa de marco y placas pero, en este caso, el filtro cuenta con un diafragma localizado detrás de la

tela filtrante. El sistema opera en etapas: primero se llena la prensa con el lodo previamente acondicionado y se aplica presión relativamente baja ($7-10.5 \text{ kg/cm}^2$) para que el agua empiece a drenar y se forme parcialmente la torta de lodo. Una vez que se ha cargado la prensa, la alimentación de lodos se detiene y se inicia el ciclo de compresión con el diafragma, por medio de aire o agua a presión al espacio formado entre el diafragma y las placas. De esta forma la torta de lodo es oprimida contra las paredes, consiguiendo una mejor eliminación de líquido. La presión aplicada al lodo se eleva entonces hasta $14 - 17.5 \text{ kg/cm}^2$. Esta compresión aumenta la concentración de sólidos en la torta entre 5 y 10% de forma adicional (EPA, 1987). Cuando finaliza este ciclo se abren las placas y se procede a descargar la prensa.

La deshidratación de lodos domésticos en filtros prensa produce una torta con una concentración de sólidos muy alta, probablemente la más alta que se pueda obtener por medios mecánicos. Sin embargo, requiere más atención por parte de los operadores que cualquier otro equipo similar, además de que los costos de operación y mantenimiento involucrados son altos. Se recomienda en plantas que tratan un caudal superior a $1.1 \text{ m}^3/\text{s}$ (EPA, 1987).

2.2.5.5 Filtros de bandas

El diseño de los filtros banda está basado en un concepto muy simple. El lodo es prensado entre dos bandas porosas que pasan tensadas alrededor de rodillos de diferentes diámetros. La presión sobre el lodo aumenta conforme el diámetro de los rodillos disminuye.

El proceso normalmente se lleva a cabo en cuatro etapas:

- Acondicionamiento con polímeros;
- zona de drenado por gravedad;
- zona de baja presión;
- zona de alta presión.

La figura 2.11 muestra un esquema simplificado de un filtro de bandas típico.

El lodo previamente acondicionado se descarga sobre la banda superior en la zona de drenado por gravedad. En esta sección, el agua libre en el lodo drena a través de la banda por efecto de la gravedad alcanzándose un aumento en la concentración de sólidos entre 5 y 10% con respecto a la alimentación (EPA, 1987). En esta fase el volumen del lodo se reduce en aproximadamente 60%.

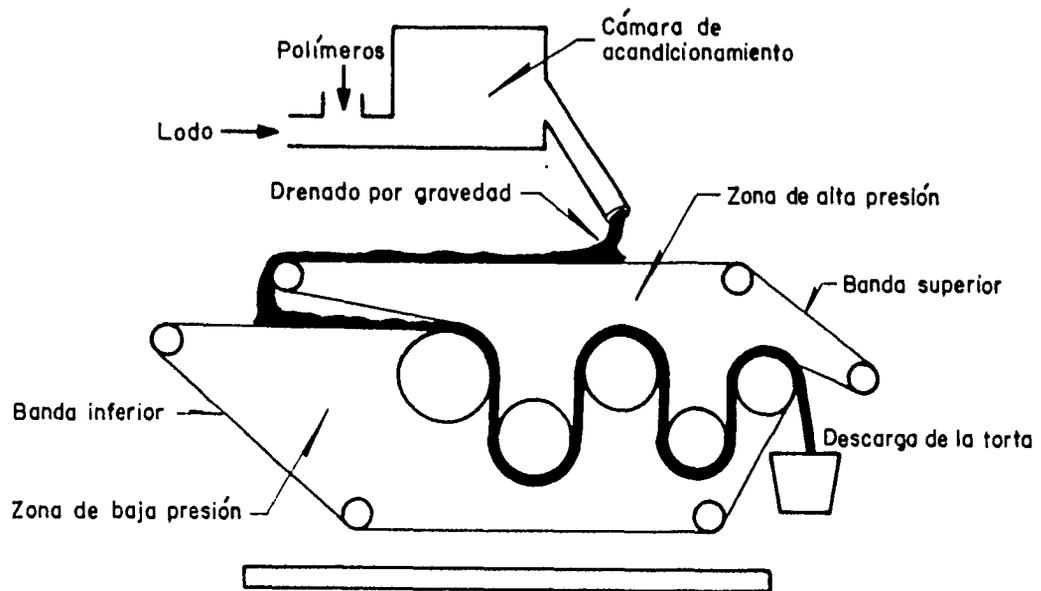


Fig. 2.11 Esquema de un filtro banda típico

La zona de baja presión es el área donde las bandas superior e inferior se juntan, apresando entre ellas al lodo. Esta zona es muy importante porque se comienza a formar una torta de lodo firme que debe resistir la fuerte presión en la siguiente etapa. En la última etapa las bandas pasan alrededor de una serie de rodillos, generalmente de diámetro decreciente, comprimiendo y deshidratando al lodo.

Algunas ventajas importantes de este tipo de filtro son:

- Su operación es continua;
- produce una torta bien deshidratada (20 a 30% de sólidos);

- consume poca energía.

Su principal desventaja es la corta vida de las bandas (EPA, 1987).

2.2.5.6 Centrifugación

La deshidratación de lodos por medio de centrifugación es un método cada vez más empleado, aunque aún no tiene la popularidad de los filtros prensa (Cheremisinoff, 1988). Puede llevarse a cabo en dos tipos de equipo centrífugo: centrifugas horizontales de transportador helicoidal y centrifugas de tazón. Ambas se describen brevemente en la sección 2.2.1. La centrifuga de discos, empleada para el espesamiento de lodos activados, no se emplea en este caso porque no produce lodo con el grado de deshidratación deseado (EPA, 1987).

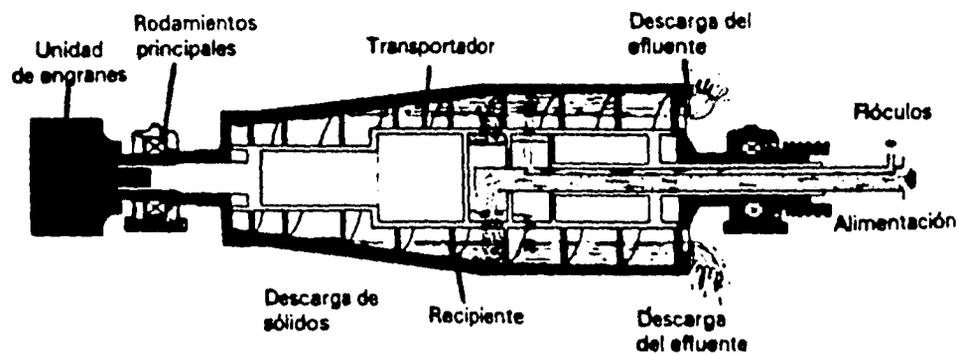


Fig. 2.12 Centrifuga de transportador helicoidal

La centrifuga de transportador helicoidal generalmente opera a contracorriente. Como muestra la figura 2.12, el lodo se alimenta a través de un tubo cerca de la unión de las secciones cilíndrica y cónica; los sólidos se desplazan hacia el extremo

cónico y el líquido fluye en dirección opuesta. El tiempo de retención hidráulica típico en una centrífuga de este tipo es de aproximadamente 20 s (Vesilind *et al*, 1986).

Las centrífugas en general son equipos compactos, completamente cerrados (lo cual reduce la emisión de malos olores), que requieren poco espacio para su instalación. Son útiles especialmente en la deshidratación de lodos que puedan obstruir los medios filtrantes. La torta de lodo contiene aproximadamente 75 a 80% de humedad (Qasim, 1985).

La principal desventaja del funcionamiento de las centrífugas es la eliminación del líquido que es rico en sólidos suspendidos no sedimentables. El envío del agua separada a la sección de tratamiento de líquidos puede elevar considerablemente la carga orgánica, disminuyendo la calidad del efluente (EPA, 1987).

2.2.6 Secado térmico

El objeto del secado térmico es eliminar la humedad del lodo de modo que se facilite su incineración o pueda utilizarse en la fabricación de fertilizantes. En este último caso, el secado es necesario para poder triturar el lodo, reducir su peso y evitar una continua acción biológica. El contenido de humedad en el lodo seco puede llegar a ser inferior al 10% (Metcalf y Eddy, 1979).

El secado del lodo se lleva a cabo a temperaturas de aproximadamente 370°C, en tanto que para una incineración total se requieren temperaturas de 650 a 730°C. Para lograr la eliminación de malos olores es necesario que los gases de escape alcancen aproximadamente los 730°C. A temperaturas inferiores puede llevarse a cabo una oxidación parcial de los compuestos productores del mal olor, dando como resultado un aumento de la intensidad o carácter desagradable del olor producido.

Para favorecer el buen funcionamiento del proceso deben eliminarse las cenizas en suspensión y controlar la emisión de gases caracterizados por su olor desagradable (Metcalf y Eddy), 1979).

El alto costo del combustible necesario para efectuar este proceso, así como el escaso mercado para el lodo seco, ha hecho que este procesos de tratamiento sea una alternativa poco utilizada (Cheremisinoff, 1988).

2.2.7 Procesos para la oxidación de material orgánico

Estos procesos involucran la conversión parcial o total de los sólidos orgánicos a productos finales de oxidación, principalmente dióxido de carbono, agua y cenizas. En el tratamiento de lodos se emplean para reducir el contenido de materia orgánica y por consiguiente el volumen del lodo.

Entre los procesos de oxidación más empleados se encuentran: incineración, oxidación húmeda y pirólisis. Todos ellos son procesos complejos que se llevan a cabo en equipos sofisticados, por lo cual son generalmente costosos y requieren para su operación personal altamente capacitado. Se recomiendan para plantas que operen con caudales de agua residual mayores de 200 l/s (EPA, 1979)

2.2.7.1 Incineración

La incineración es la combustión completa de todas las sustancias orgánicas presentes en el lodo. Es el método más eficiente de estabilización ya que destruye totalmente los organismos presentes en el lodo, elimina los malos olores y transforma todo el material orgánico a dióxido de carbono, agua y cenizas.

Al diseñar un incinerador para lodos, debe efectuarse un detallado balance de energía. Se requieren aproximadamente entre 1,000 y 1,400 kcal para evaporar un

kilogramo de agua en el lodo (Metcalf y Eddy, 1979). El calor se obtiene por la combustión de la materia orgánica del lodo y quemando combustibles auxiliares. Generalmente, para la incineración de lodo primario crudo solo se requiere combustible suplementario para calentar el incinerador y para mantener la temperatura deseada cuando el contenido de materia volátil sea bajo. El lodo crudo tiene un contenido calorífico que oscila entre 3,600 y 5,300 kcal/kg de sólidos secos, dependiendo del tipo de lodo y de su contenido de sólidos volátiles, mientras que el del lodo digerido oscila entre 1,400 y 3,000 kcal/kg (Ramalho, 1983). Con una deshidratación previa adecuada (aproximadamente 30% de sólidos), el proceso puede reducir el volumen del lodo hasta en un 90% sin la necesidad de combustible suplementario, excepto para el calentamiento inicial y control térmico (Vesilind *et al*, 1986).

Actualmente, la incineración de lodos se lleva a cabo con gran éxito en hornos de pisos múltiples, incineradores de lecho fluidizado y sistemas de secado instantáneo (Cheremisinoff, 1988).

Debido a que es un equipo relativamente simple, durable y lo suficientemente flexible para quemar una amplia variedad de materiales, el horno de pisos múltiples es uno de los dispositivos más eficientes y antiguos empleados para el secado e incineración de lodos (EPA, 1979). Consiste de un cilindro metálico con varios hogares dispuestos en planos horizontales y una flecha central giratoria que acciona rastras para cada piso. El lodo previamente deshidratado se alimenta a través de una compuerta en lo alto del horno y va bajando de piso con la ayuda de las rastras. En los pisos superiores se vaporiza el exceso de humedad y se enfrían los gases de escape. En los pisos intermedios los sólidos volátiles se queman y, finalmente los pisos inferiores se usan para la combustión lenta de algunos compuestos y para el enfriamiento de las cenizas. La temperatura de operación en la sección superior es de aproximadamente 550°C, en la sección intermedia entre 900 y 1000°C y de 350°C en el fondo del incinerador (Vesilind, 1979).

La incineración en un lecho fluidizado se lleva a cabo en un lecho de arena utilizado como depósito térmico para favorecer la combustión uniforme de los sólidos. En este caso, es totalmente indispensable que el lodo sea previamente deshidratado y precalentado, aproximadamente hasta 700°C, antes de entrar al reactor de lecho fluidizado (Vesilind, 1979). Dentro del reactor el lodo se seca y oxida a

aproximadamente 815°C, mientras que los gases resultantes de la combustión, la ceniza y el vapor de agua salen a través de un separador (por vía húmeda) donde se separa la ceniza de los gases, los cuales salen por una chimenea (Metcalf y Eddy, 1979).

El sistema de secado instantáneo se utiliza para el secado y/o para la incineración de lodos; pueden realizar ambas operaciones simultáneamente. Parte del material ya secado se mezcla con la alimentación de lodo y el conjunto se seca con una corriente de gases calientes. Tras la separación de los gases del lodo seco en un ciclón, se divide el lodo seco en dos corrientes enviándose una parte de él a la entrada para mezclarse con lodo crudo y la otra al horno de incineración o a su disposición como lodo seco. El vapor del ciclón se regresa al horno para su deodorización.

2.2.7.2 Oxidación húmeda

El proceso de oxidación o combustión húmeda se lleva a cabo a presión y temperatura elevadas en presencia de agua líquida. Ha sido patentado y comercializado con el nombre de proceso Zimpro (EPA, 1974). Operando a temperatura y presión menores se emplea como acondicionamiento para la deshidratación (ver sección 2.2.4.).

A diferencia de los procesos convencionales de combustión, este proceso realiza la oxidación de lodo crudo húmedo. Si se aplica la temperatura, presión y tiempo de reacción adecuados y se proporciona al sistema el aire u oxígeno suficientes, se alcanza el grado de oxidación deseada.

El lodo crudo se mezcla con aire a presión y se envía a través de una serie de intercambiadores de calor al reactor, el cual se encuentra a presión regulada con el propósito de mantener el agua en fase líquida a la temperatura de operación del reactor, entre 175 y 316°C (Metcalf y Eddy, 1979). Los productos que salen del reactor son una mezcla de gases, líquido y cenizas.

El líquido y la ceniza son recirculados a través de los intercambiadores de calor para calentar la corriente de alimentación de lodos; posteriormente se extraen del sistema a través de una válvula reductora de presión. Los gases liberados por la caída de presión se separan y envían a la atmósfera.

2.2.7.3 Pirólisis

La mayoría de las sustancias orgánicas son térmicamente inestables, por lo que al calentarse en una atmósfera deficiente en oxígeno se llevan a cabo reacciones químicas durante las que se producen fracciones gaseosa, líquida y sólida. A este proceso se le conoce como pirólisis. En contraste con los procesos de combustión, que son altamente exotérmicos, la pirólisis es un proceso endotérmico.

La pirólisis se lleva a cabo a temperaturas desde 370 a 870°C en ausencia de aire o cualquier otro gas que facilite la combustión.

Al igual que la incineración, reduce considerablemente el volumen de sólidos generando un producto final estéril. Este proceso, además, elimina gases que puedan contaminar el aire.

2.2.8 Disposición final

Una vez que los lodos han sido tratados, están listos para su disposición final. Los métodos comunes para llevarla a cabo son:

- Relleno sanitario;
- uso como mejorador de suelos;
- disposición sobre terreno;
- confinamiento controlado;
- vertido al mar.

El método elegido determina en gran medida el tipo de tratamiento previo que requieren los lodos.

2.2.8.1 Relleno Sanitario

Este método consiste en depositar los residuos en un área alejada de lagos, estanques, ríos, pozos para suministro de agua, carreteras, aeropuertos y zonas habitadas (Bagchi, 1990), cubriéndolos posteriormente con tierra. Si se construye en un sitio apropiado, un relleno sanitario para desechos domésticos (lodos, arena, cenizas de incinerador y otros residuos sólidos) no requiere un sistema colector de líquido que pueda filtrarse a través los residuos y del suelo.

Para disponer lodos de aguas residuales domésticas en rellenos sanitarios se requiere su estabilización previa y, de preferencia, también su deshidratación para minimizar el agua libre que pueda filtrarse. Se construye extendiendo el lodo en capas uniformes de no más de 60 cm de espesor, compactándolo y cubriéndolo cuando menos con 15 cm de tierra al final de cada día de trabajo. Una vez que se llena el área excavada, se cubre con una capa de tierra compacta con una profundidad mínima de 60 cm (EPA, 1974). También es recomendable plantar pasto sobre la cubierta de tierra para prevenir la erosión.

Después de varios años durante los cuales los residuos se disponen de esta manera, el terreno resultante puede usarse como lugar de esparcimiento u otras finalidades, siempre y cuando no haya asentamiento del terreno.

2.2.8.2 Uso como mejorador de suelos

Una de las alternativas más atractivas para la disposición final de lodos domésticos es su utilización como mejorador de suelos agrícolas o forestales, ya que contiene algunos macronutrientes importantes, principalmente nitrógeno y fósforo y, en la

mayoría de los casos, cantidades importantes de micronutrientes tales como boro, manganeso, cobre, molibdeno y zinc (EPA, 1983).

Aplicación a tierras agrícolas. A pesar de que los nutrientes no se encuentran en la proporción de cualquier fertilizante balanceado, la mayoría de los cultivos agrícolas responden favorablemente a la aplicación de lodo. El lodo aumenta la porosidad de suelos de textura fina, facilitando el crecimiento de las raíces y la circulación de aire y agua. Cuando se aplica a suelos arenosos de textura gruesa, incrementa la capacidad del suelo para retener agua y propicia la adsorción e intercambio de nutrientes.

Para prevenir la contaminación por nitratos en corrientes subterráneas y superficiales, su aplicación se limita generalmente a la cantidad de lodos que contengan el nitrógeno requerido por el cultivo (Vesilind *et al*, 1986). Debe llevarse un riguroso control sobre la cantidad de tóxicos (metales pesados principalmente) que contiene el lodo aplicado: se debe evitar sobrepasar las concentraciones máximas permisibles en el suelo. Cuando se trata de cultivos para consumo humano se requiere además, desinfección (secado térmico, pasteurización, etc.) o, cuando menos, debe permitirse que transcurra un lapso de 18 meses entre la aplicación del lodo y la siembra de cultivos (EPA, 1983).

El lodo se puede aplicar deshidratado o en forma líquida, extendiéndolo en la superficie o por inyección en el suelo.

Aplicación en tierras forestales. Existen tres categorías de tierras forestales en las que se pueden disponer lodos domésticos, como mejorador de suelos:

- Tierras recientemente taladas;
- plantaciones recientes (hasta 10 años de edad);
- bosques establecidos.

Se ha demostrado que los lodos domésticos contienen nutrientes frecuentemente ausentes en este tipo de suelos. Su aplicación tanto a plantíos recientes como a bosques establecidos acelera notablemente el crecimiento de los árboles y, al igual

que en tierras agrícolas, incrementa la porosidad de suelos de textura fina o aumenta la capacidad para retener agua en suelos arenosos (EPA, 1983).

Generalmente, la producción forestal no forma parte de las cadenas alimenticias directamente relacionadas con el hombre, por lo que los riesgos para la salud ocasionados por el consumo de los constituyentes del lodo se reducen a valores despreciables. Algunas investigaciones indican que existen especies de árboles muy resistentes a los tóxicos presentes en el lodo (por ejemplo metales pesados) y que, por el contrario, dañan a ciertos cultivos agrícolas; por otro lado, en los bosques no se llevan a cabo ciclos cortos de siembra y cosecha, lo cual simplifica el programa para la aplicación de lodo. En algunos casos se realiza solamente una aplicación o varias aplicaciones en intervalos de 3 a 5 años (EPA, 1983).

Después de la aplicación del lodo, aún previamente estabilizados, es importante evitar el contacto con personas cuando menos durante 12 meses (EPA, 1983).

La principal desventaja de esta forma para la disposición de lodos es que, generalmente, el acceso para el equipo convencional de aplicación es difícil. En algunos casos es necesario utilizar equipo especial o abrir caminos de acceso, lo cual representa importantes costos adicionales.

2.2.8.3 Disposición sobre terreno

Una manera más de obtener beneficios adicionales mediante la disposición final de lodos tratados consiste en su aplicación sobre tierras poco fértiles, dañadas o estériles, para favorecer su recuperación. Este tipo de suelos (por ejemplo, aquellos deteriorados como consecuencia de actividades mineras) se caracterizan porque contienen bajas concentraciones de nutrientes y porque al encontrarse generalmente en zonas rocosas o arenosas, su capacidad para retener agua y para intercambiar iones es deficiente. Contienen muy poco material orgánico (si es que lo hay) y la actividad biológica en el suelo es muy pobre; normalmente contienen metales pesados y sales minerales que pueden alcanzar niveles tóxicos para la vegetación y/o para sus consumidores.

Los lodos domésticos tienen características apropiadas para favorecer la recuperación de suelos deteriorados; una de las más importantes es su contenido de materia orgánica. También mejoran las propiedades físicas del suelo ya que incrementa su potencial para intercambio iónico, suministra nutrientes para el desarrollo de vegetación, favorece la neutralización del pH y ayuda a incrementar el número y la actividad de microorganismos (EPA, 1983).

Normalmente se efectúa solo una aplicación de lodo en una proporción mayor que la empleada para acondicionar tierras agrícolas. Debe cuidarse que la cantidad aplicada no represente riesgos de fitotoxicidad para futuras plantaciones o que los escurrimientos transporten nitratos que contaminen los mantos acuíferos. Por otro lado, este tipo de suelos se encuentra generalmente en zonas alejadas y de difícil acceso, lo cual representa la principal desventaja de este método: los gastos por transportación pueden hacerlo incosteable (EPA, 1983).

2.2.8.4 Confinamiento controlado

Otra modalidad de la distribución de lodos sobre terreno consiste en su aplicación en suelos con o sin vegetación con el único propósito de disponer de ellos. Esta opción difiere de las anteriores en que el lodo se aplica en cantidades mucho mayores y la producción de vegetación o cultivos no tiene importancia. Para llevarse a cabo se requieren menores extensiones de tierra y se puede aplicar para disponer de lodos cuyo potencial contaminante los haga inadecuados para su disposición en tierra. Es muy importante que el sistema se someta a un cuidadoso diseño, construcción y manejo para retener los elementos que pudieran deteriorar el ambiente. Normalmente se requiere la construcción de estructuras de retención con ductos para la colección de escurrimientos potencialmente dañinos. El lugar destinado a la disposición debe estar totalmente alejado del acceso humano.

2.2.8.5 Vertido al mar

El vertido al mar de lodo digerido ha sido una buena alternativa en ciudades costeras; sin embargo, esta opción está siendo cada vez menos utilizada en vista del deterioro que puede causar a la ecología marina (Vesilind *et al*, 1986).

El lugar destinado para la descarga deberá elegirse cuidadosamente. De preferencia debe situarse a varios kilómetros de la costa donde haya fuertes corrientes que faciliten la rápida dispersión del lodo, evitando que pueda regresar a la playa. La descarga puede efectuarse mediante barcazas o botes especialmente diseñados para transportar lodos o bombearse hacia aguas profundas mediante ductos submarinos (Vesilind, 1979).

Para llevar a cabo esta operación, no es necesario deshidratar previamente los lodos, aunque en algunos casos es recomendable espesarlos para hacer más económico su manejo (EPA, 1974).

2.2.8.6 Inyección en pozos profundos

Antiguamente la disposición de lodos se efectuaba almacenándolos bajo tierra en pozos profundos (Vesilind *et al*, 1986) pero ahora esta técnica solo es atractiva cuando se dispone de pozos profundos ya construidos (por ejemplo, algunos pozos petroleros).

Tiene la ventaja de asegurar casi por completo que los desechos no entrarán en contacto con el hombre. Es un proceso irreversible: si se detectara contaminación en mantos freáticos es muy poco probable poder detener el problema. Una vez que los residuos están bajo tierra, difícilmente podrán extraerse nuevamente.

Al igual que otros métodos de disposición de lodos en tierra, es recomendable estabilizarlos para disminuir la presencia de patógenos.

2.3 Bombeo de lodos

Al igual que en la mayoría de los procesos, en el tratamiento de lodos los elementos de conexión entre las diferentes etapas son principalmente tuberías, válvulas y bombas. En este caso, el bombeo es un factor crítico para la operación correcta de una planta, ya que a lo largo del tratamiento se presentan lodos con diferentes presiones, concentración de sólidos, caudales, etc. y sus propiedades cambian conforme aumenta la concentración. Por ello resulta importante analizar el comportamiento de los lodos en cuanto a sus propiedades como fluidos.

La selección y dimensionamiento de un sistema de bombeo apropiado se determina predominantemente por la confiabilidad, seguridad, requerimientos operativos del sistema, facilidad para el mantenimiento y reparaciones y la inversión total. Factores como el ahorro de energía se consideran secundarios.

2.3.1 Propiedades de flujo

Un fluido es una sustancia que se deforma continuamente cuando se le sujeta a un esfuerzo sin importar su magnitud. Una fuerza cortante actúa tangencialmente a una superficie y al distribuirse sobre ella da como resultado el esfuerzo cortante medido sobre dicha área (Streeter, 1975). La resistencia que ofrece un fluido real a una deformación de esta índole se conoce como su consistencia. Los fluidos se clasifican de acuerdo con sus propiedades de flujo en fluidos newtonianos y fluidos no newtonianos (Perry y Chilton, 1987).

Los fluidos newtonianos son aquellos en los que existe una relación lineal entre la magnitud del esfuerzo cortante y la rapidez de la deformación resultante, es decir

que su consistencia es constante si la presión estática y la temperatura son fijas. Para este tipo de materiales la consistencia se denomina viscosidad. Las ecuaciones 2.15 y, expresada en forma diferencial, la 2.16 definen su comportamiento; el factor de proporcionalidad es precisamente la viscosidad.

$$F = \mu uA/y \quad (2.15)$$

$$T = \mu du/dy \quad (2.16)$$

donde:

- F fuerza cortante;
- A área;
- μ viscosidad;
- u velocidad;
- y distancia del desplazamiento;
- T esfuerzo cortante;
- du/dy gradiente de velocidad.

Si la consistencia de un líquido es función del esfuerzo cortante, de la temperatura y de la presión, el fluido se clasifica como no newtoniano. Estos fenómenos se observan solo en cierta clase de fluidos, los cuales se dividen comúnmente en tres clases generales:

- Aquellos cuyas propiedades son independientes del tiempo o duración del esfuerzo cortante;
- aquellos cuyas propiedades dependen del esfuerzo cortante y del tiempo;
- aquellos que manifiestan muchas propiedades de un sólido (fluidos viscoelásticos).

Dentro de la primera categoría se encuentran los fluidos plásticos tipo Bingham, fluidos seudoplásticos y fluidos dilatantes. Los primeros difieren de los fluidos newtonianos únicamente en que requieren un esfuerzo cortante finito T_y para iniciar el flujo como relación lineal entre el esfuerzo aplicado y la razón de éste. Los materiales seudoplásticos incluyen a la mayoría de los fluidos no newtonianos como soluciones poliméricas y suspensiones de pigmentos entre otros; se

caracterizan porque la viscosidad aparente disminuye conforme aumenta el esfuerzo cortante. Por el contrario, un fluido dilatante es aquel en que la viscosidad aparente aumenta al incrementarse la razón del esfuerzo cortante. El comportamiento de estas tres clases de fluidos se ilustra y compara con fluidos newtonianos en la figura 2.13 (a).

Entre los materiales cuyas propiedades y el esfuerzo cortante dependen de la duración del mismo se encuentran los fluidos reopécticos y los tixotrópicos. Los reopécticos son aquellos en los que la viscosidad aparente aumenta con gran rapidez cuando se someten a sacudimientos o agitaciones rítmicas. Los fluidos tixotrópicos son aquellos en los que disminuye la viscosidad aparente con respecto al tiempo y a un esfuerzo cortante determinado. En la figura 2.13 (b) se ilustra el diagrama de esfuerzo cortante de un fluido tixotrópico tal como se obtiene en un viscosímetro rotacional. El área comprendida entre las dos curvas indica la magnitud de tixotropía presente.

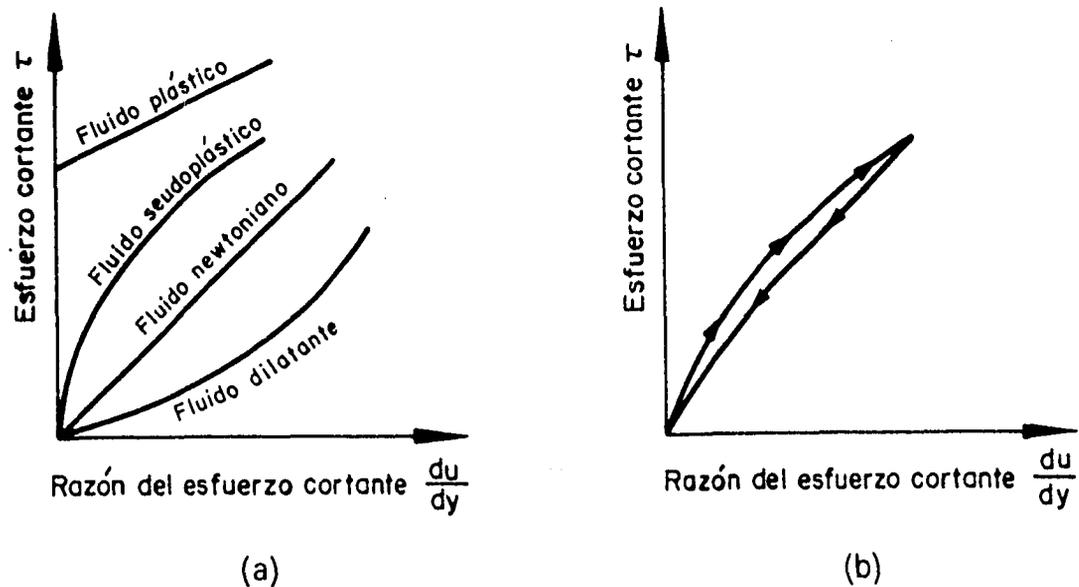


Fig. 2.13 Diagramas de esfuerzo cortante (a) para diferentes tipos de fluidos, (b) para fluidos que presentan comportamiento tixotrópico.

La mayoría de los lodos de aguas residuales domésticas se comportan como fluidos pseudoplásticos debido al alto contenido de material orgánico con grandes

cantidades de fracciones coloidales. Comúnmente presentan también comportamiento tixotrópico, lo cual dificulta considerablemente el análisis de su mecánica de fluidos en tuberías (Lonhman y Garber, 1988).

2.3.2 Equipo de bombeo recomendable para transportar lodos

Dependiendo de las características del lodo el equipo de bombeo aplicable puede ser el siguiente:

- Para lodos con bajas viscosidades se recomiendan bombas centrífugas. Su instalación y mantenimiento es sencillo y normalmente funcionan sin atascarse.
- Para lodos con viscosidades más altas se recomiendan bombas tornillo y de cavidad progresiva (desplazamiento positivo).
- Para lodos con viscosidades y presiones variables se recomiendan bombas de diafragma y de cavidad progresiva (desplazamiento positivo).
- Para lodos con altas concentraciones de sólidos las bombas especiales tipo pistón y algunas de cavidad progresiva son útiles.
- - Para lodos deshidratados se recomiendan transportadores de bandas.

2.3.2.1 Lodos con concentraciones de sólidos hasta 10%

En esta categoría se encuentran los lodos crudos y los generados por medio de espesamiento cuya concentración fácilmente supera el 7%, dependiendo de las características del lodo y del diseño del espesador.

cantidades de fracciones coloidales. Comúnmente presentan también comportamiento tixotrópico, lo cual dificulta considerablemente el análisis de su mecánica de fluidos en tuberías (Lonhman y Garber, 1988).

2.3.2 Equipo de bombeo recomendable para transportar lodos

Dependiendo de las características del lodo el equipo de bombeo aplicable puede ser el siguiente:

- Para lodos con bajas viscosidades se recomiendan bombas centrífugas. Su instalación y mantenimiento es sencillo y normalmente funcionan sin atascarse.
- Para lodos con viscosidades más altas se recomiendan bombas tornillo y de cavidad progresiva (desplazamiento positivo).
- Para lodos con viscosidades y presiones variables se recomiendan bombas de diafragma y de cavidad progresiva (desplazamiento positivo).
- Para lodos con altas concentraciones de sólidos las bombas especiales tipo pistón y algunas de cavidad progresiva son útiles.
- - Para lodos deshidratados se recomiendan transportadores de bandas.

2.3.2.1 Lodos con concentraciones de sólidos hasta 10%

En esta categoría se encuentran los lodos crudos y los generados por medio de espesamiento cuya concentración fácilmente supera el 7%, dependiendo de las características del lodo y del diseño del espesador.

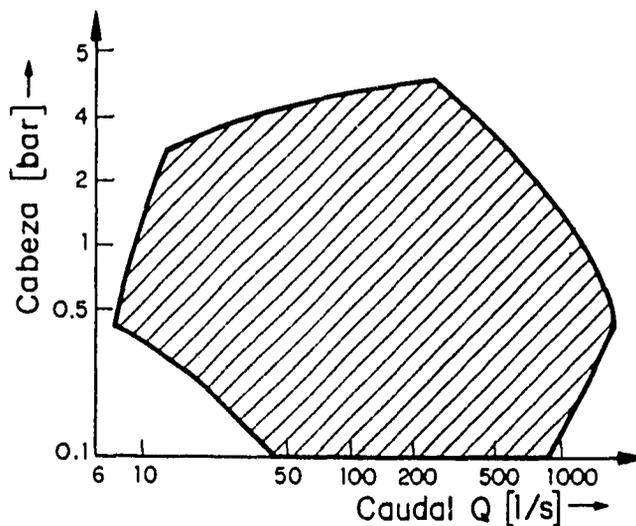


Fig. 2.14 Intervalo de operación de una bomba centrífuga con impulsor en espiral.

Una alternativa a las bombas centrífugas de impulsor cerrado, usadas en muchas instalaciones, son las bombas centrífugas con impulsor en espiral. Se han empleado exitosamente para bombear lodos con concentraciones de sólidos hasta 15%, sujetos a condiciones tixotrópicas a grandes distancias (Lonhman y Garber, 1988).

El impulsor, en una bomba de este tipo, combina las propiedades de un impulsor centrífugo y un tornillo sin fin. Por su forma en espiral, se introduce totalmente en el seno del lodo que será bombeado y lo envía hacia el punto de descarga. Su desgaste es relativamente bajo al haber poca fricción entre las paredes del impulsor y el fluido que transporta.

Cuando se manejan lodos con concentraciones de sólidos que se acerquen al 15% se recomienda llevar a cabo pruebas de operación antes de diseñar el sistema de bombeo debido a que las propiedades de flujo de los lodos puede variar ampliamente de instalación a instalación. La figura 2.14 muestra el intervalo de operación de este tipo de bombas.

2.3.2.2 Lodos con concentraciones de sólidos hasta 25%

Una alternativa interesante a las bombas de diafragma y las bombas tornillo, cuando se requieren presiones superiores a 10 bar, son las bombas de lóbulos o pistones rotatorios.

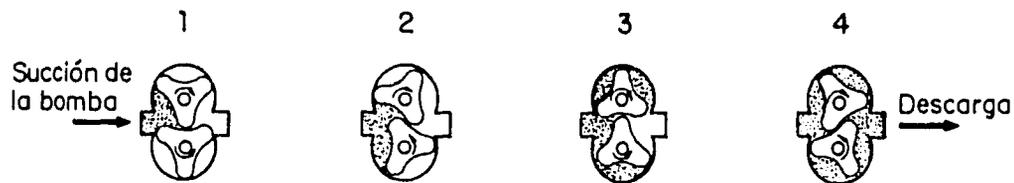


Fig. 2.15 Esquema de la operación de una bomba de lóbulos o pistones rotatorios

Una bomba de este tipo opera básicamente como se muestra en la figura 2.15. En un principio, la rotación de los pistones genera vacío (fig. 2.15 a), provocando la succión del lodo que queda entre la carcasa y el rotor (fig. 2.15 b y c), expulsándolo después de la bomba (fig. 2.15 d). Este equipo puede bombear el lodo también en dirección opuesta si se invierte el sentido de giro de los rotores. Es relativamente insensible a operación en seco y ha sido empleada con éxito para transportar lodo con concentraciones de sólidos desde 10% hasta 29% en algunas ocasiones (Lohnman y Garber, 1988).

Las bombas de cavidad progresiva se caracterizan por el diseño especial del impulsor de tornillo excéntrico en forma helicoidal (rotor) y de las paredes internas de la bomba cuya forma es geoméricamente igual a la del rotor, pero con un defasamiento de 180° (ver figura 2.16). Al girar el rotor se forman cavidades

progresivas que se abren y cierran intermitentemente por las que circula el fluido desde la succión a la descarga de la bomba (ver figura 2.17). Al igual que las bombas de lóbulos si se invierte el sentido de giro del rotor es posible transportar el fluido en dirección opuesta.

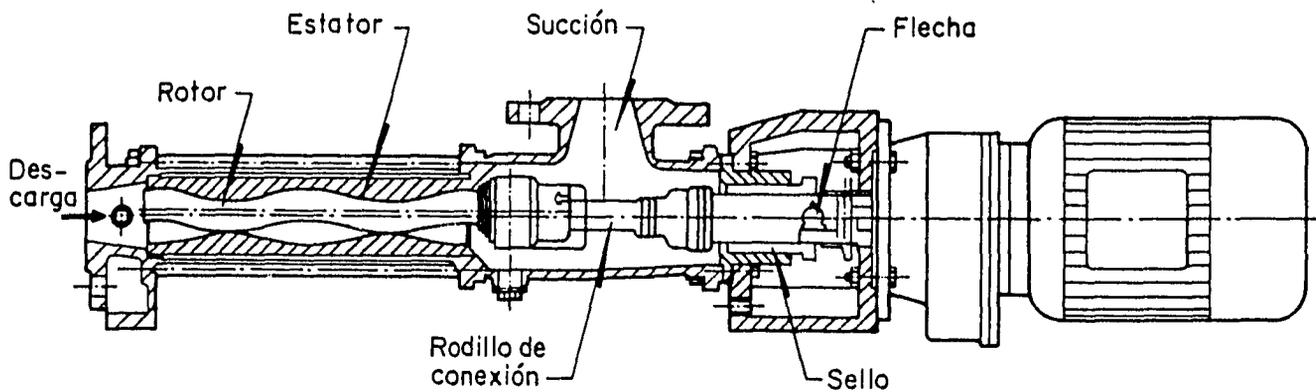


Fig. 2.16 Bomba de cavidad progresiva

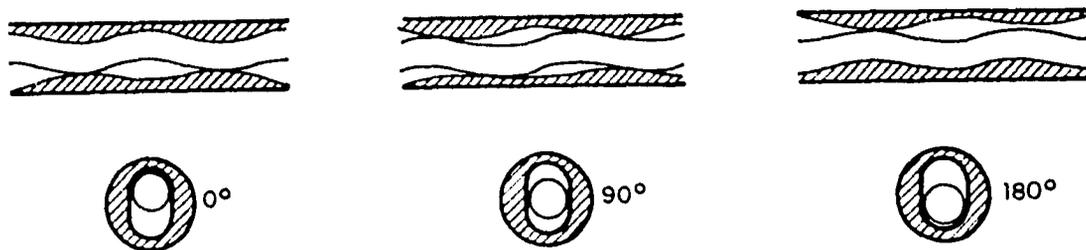


Fig. 2.17 Esquema de la operación de una bomba de cavidad progresiva

En este tipo de bombas se mantiene un sello desde la succión hasta la descarga en cualquier posición del tornillo ya que existe contacto permanente entre éste y las paredes internas de la bomba. Esto ayuda a obtener una succión apropiada y altas presiones. Se recomiendan para fluidos con altas concentraciones de sólidos o para el bombeo de productos delicados. Se han empleado exitosamente para el bombeo de lodos deshidratados con concentraciones entre 20 y 30% de sólidos.

2.3.2.3 Lodos con concentraciones de sólidos hasta 50%

Convencionalmente se emplean transportadores de bandas para el transporte del lodo después de su deshidratación mecánica. En algunas ocasiones se requiere enviar el lodo a distancias que exceden lo recomendable para este equipo (20 a 50m): en estos casos se ha hecho uso de bombas tornillo acopladas a dos pistones cilíndricos (fig. 2.18).

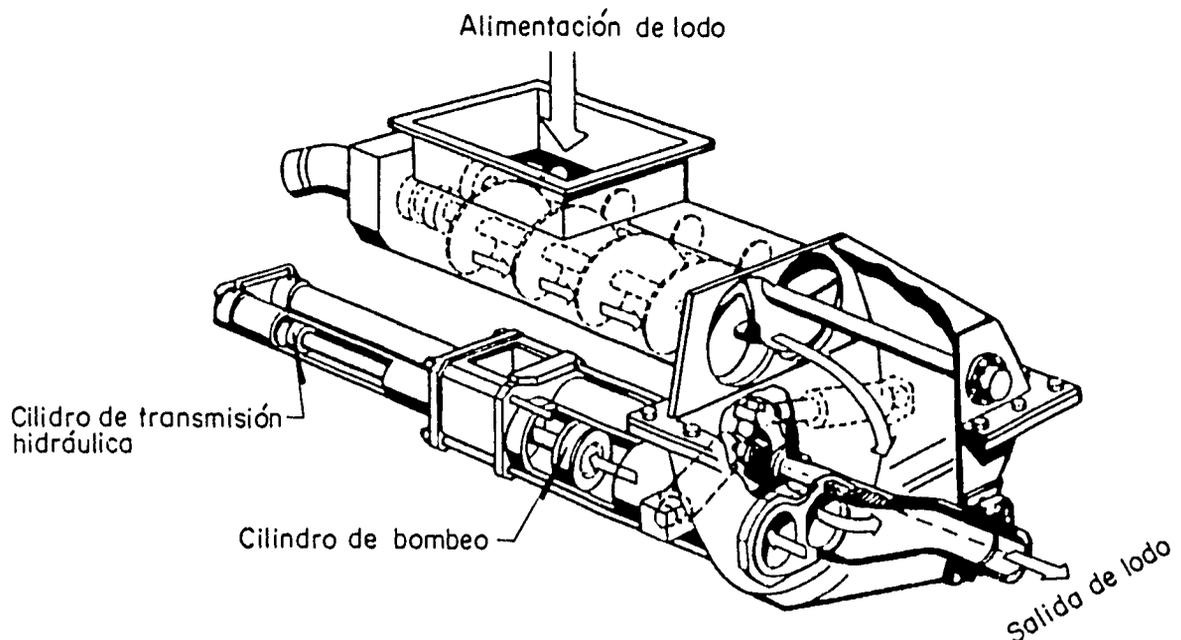


Fig. 2.18 Operación de una bomba de dos pistones cilíndricos con transmisión hidráulica.

Estas bombas se usaron originalmente para bombear concreto pero se les encontró ampliamente útiles en toda la industria para el transporte de fluidos pastosos a presiones medias y altas. Ofrecen ventajas sobre otros sistemas de bombeo en cuanto a su reparación y mantenimiento y, en la mayoría de los casos, su costo, incluyendo instalación, es menor que otros sistemas opcionales. El lodo se puede manejar en tuberías, reduciendo malos olores y otros problemas de manejo.

Los dos pistones se mueven en sentidos opuestos manteniendo un flujo relativamente uniforme ya que el intervalo de tiempo entre la acción de un pistón y el otro es de menos de un segundo. El control del caudal puede efectuarse mediante válvulas de disco o un tubo de transferencia "S" que se prefiere cuando el lodo contiene partículas gruesas o de grandes diámetros.

3. NECESIDADES ACTUALES EN MEXICO

Para situar este trabajo es necesario establecer las condiciones tecnológicas y socioeconómicas del país a las que ha de sujetarse la selección de sistemas viables para tratamiento de lodos. Para ello se llevó a cabo una investigación bibliográfica básica conjuntamente con entrevistas a funcionarios de dependencias a cuyo cargo está la problemática de tratamiento y reuso del agua, así como de protección al medio ambiente (Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEDUE; Comisión Nacional del Agua, CNA, dependiente de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, SARH; Departamento del Distrito Federal, DDF; Fondo Nacional de Fomento para el Turismo, FONATUR).

Uno de los principales problemas de países en desarrollo es el acelerado crecimiento de necesidades frente a la falta de recursos tecnológicos y económicos para solventarlos. En México se ha hecho cada vez más necesario atender problemas ambientales ocasionados principalmente por el crecimiento industrial tanto como el de la población; ambos han propiciado la demanda excesiva de

recursos hídricos entre otros y la generación de residuos, algunos de ellos peligrosos para el equilibrio ecológico o el ambiente.

Hablando específicamente de la producción de lodos de aguas residuales domésticas, existen varios factores que han contribuido al escaso desarrollo de sistemas para su tratamiento. Entre ellos se cuentan la falta de reglamentación adecuada que limite su descarga directamente al drenaje o bien que proponga métodos de tratamiento antes de su utilización o disposición final, la poca experiencia e información que se ha generado en el país al respecto, los presupuestos reducidos que no permiten a los organismos encargados atender con eficiencia la gran cantidad de problemas ambientales a los que se enfrentan, la falta de personal capacitado para manejar instalaciones y equipo sofisticado, etc.

Con respecto a la reglamentación, existe algunas publicaciones legales acerca de residuos y residuos peligrosos; sin embargo, todavía no existe ninguna norma específica que regule concretamente el problema que nos ocupa.

En la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente se prevé la necesidad de regular las actividades relacionadas con residuos peligrosos y establece que corresponderá al gobierno federal por conducto de SEDUE evaluar el impacto ambiental ocasionado por instalaciones de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos peligrosos (Diario Oficial, 1988 a). Define residuo peligroso como todo aquel residuo en cualquier estado físico que por sus características corrosivas, tóxicas, venenosas, reactivas, inflamables, explosivas, biológicas, infecciosas o irritantes, representan un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente (Diario Oficial, 1988 b). La propia ley señala al mismo organismo como responsable de determinar y publicar listados de aquellos materiales que se consideren peligrosos y normas técnicas para manejarlos.

En respuesta a lo establecido anteriormente, SEDUE expide la Norma Técnica Ecológica correspondiente y, más tarde, un reglamento en materia de residuos peligrosos. En la primera se equiparan las características venenosas, biológicas, infecciosas e irritantes de un residuo a las de toxicidad del mismo. Contradictoriamente, al establecer los criterios para considerar a un residuo peligroso por su toxicidad, señala una serie de constituyentes entre los cuales no se cuenta ningún contaminante biológico o infeccioso (Diario Oficial, 1988 c). En el

listado de residuos peligrosos se menciona por primera vez a los lodos producidos por la oxidación de tratamiento de aguas residuales, aunque ya en la Ley General se determina que para prevenir y controlar la contaminación del agua es necesario que las aguas residuales de origen urbano reciban tratamiento previo a su descarga en cuerpos receptores naturales a fin de eliminar los contaminantes presentes en ellas. Esto necesariamente implica que los lodos separados durante dicho tratamiento contienen la mayor parte del material contaminante separado del agua residual y que representan una fuente importante de contaminación.

Por su parte, el reglamento mencionado establece entre otras cosas que corresponde al generador de residuos determinar si éstos son peligrosos o no, en cuyo caso deberá manejarlos y tratarlos si es necesario, de acuerdo a normas que para el efecto se expidan (Diario Oficial, 1988 d). En el caso de lodos de aguas residuales domésticas, aún no existen normas. Al analizar este trabajo hay que hacer notar que si bien está claro que pretende simplificar el control sobre la generación y manejo de residuos peligrosos, también es cierto que las labores de inspección y vigilancia del cumplimiento de normas y reglamentos se eleva considerablemente, quizá hasta niveles en que los mismos organismos encargados no tengan la capacidad suficiente para llevarlas a cabo.

El reglamento establece también tres sistemas para la disposición final de residuos peligrosos: confinamiento controlado, confinamiento en formaciones geológicas estables y receptores de agroquímicos, en el que únicamente se pueden disponer residuos de productos agroquímicos y sus envases (Diario Oficial, 1988 e). Los lodos residuales domésticos, considerados residuos peligrosos, en su mayoría se descargan al drenaje aún cuando el país cuenta con tres instalaciones para confinamiento controlado (Aguilar, 1991).

En síntesis, los lodos provenientes de la oxidación de aguas residuales se consideran legalmente residuos peligrosos. Sin embargo, la reglamentación respectiva es aún muy limitada y no cubre específicamente lo relacionado con ellos. Es evidente la urgencia de contar con normas que contribuyan a la implantación de sistemas para su tratamiento; sin embargo, es indispensable analizar también aspectos más prácticos de tal manera que los sistemas propuestos representen una solución viable a este problema, aún cuando existan deficiencias en la reglamentación correspondiente.

Uno de los aspectos más importantes que fue mencionado por todos los entrevistados es la falta de recursos económicos en el país, mas aún cuando se toma en cuenta que el costo de una sección para tratamiento de lodos bien establecida fluctúa entre una tercera parte y la mitad de los costos totales de una planta para tratamiento de aguas residuales. Otro problema, no menos grave, es la falta de personal capacitado para la operación y mantenimiento de instalaciones y si a esto se suma que no se cuenta con tecnología suficiente para la fabricación de equipo de medición y tratamiento, la situación del país en lo que se refiere a prevenir y controlar la contaminación por esta clase de residuos resulta crítica. Hay que reconocer que el interés mostrado tanto por el sector público como el privado ha ido en aumento, lo cual favorece la planeación de medios para tratar de resolver el problema.

Con base en estas consideraciones y en las comunicaciones personales citadas anteriormente, se establece en este trabajo que los sistemas para tratamiento de lodos más adecuados a la situación real del país son aquellos cuya operación y manejo sea más sencillo, que requiera menos equipo y que sus costos iniciales así como los de operación y mantenimiento se mantengan dentro de ciertas limitaciones económicas, siempre y cuando solucionen con eficiencia los problemas ocasionados por la generación de estos residuos.

Desde el punto de vista económico, es conveniente que el tratamiento de lodos cuente con una primera etapa de espesamiento para reducir su volumen. El método de espesamiento más común por su economía así como por su sencillez y facilidad de operación es el espesamiento por gravedad, que será la única opción propuesta en este trabajo.

Es importante considerar que los lodos contienen la mayor parte del material orgánico indeseable que es separado de las aguas residuales; esto hace que puedan ocasionar graves problemas de contaminación en cuerpos hidráulicos naturales y en centros de población provocando daños a la ecología, desertificación de tierras, enfermedades gastrointestinales e infecciones en la piel por el contacto directo e indirecto con aguas contaminadas. Todo esto hace necesario que un sistema para tratamiento de lodos incluya también algún proceso de estabilización

para disminuir el contenido de organismos patógenos, reducir los olores desagradables y transformar otras sustancias indeseables.

Entre los métodos de estabilización presentados en el capítulo anterior existen varios que pueden adaptarse a las necesidades planteadas. La digestión anaerobia y la digestión aerobia, por ejemplo, son métodos eficientes para la destrucción de organismos patógenos y ambos ofrecen otras ventajas importantes. El proceso aerobio es más sencillo y menos sensible a cambios en la operación que el anaerobio. Considerando que en México no se cuenta con experiencia suficiente en procesos de digestión anaerobia ni con el personal capacitado necesario para manejarlos, se recomienda la digestión de lodos por vía aerobia, a pesar de que sus costos de operación son considerablemente mayores. Sin embargo, ambos procesos podrían emplearse con éxito en el país de acuerdo con las necesidades específicas de cada caso (Sorchini, 1990; Mejía, 1990). En la mayoría de las plantas para tratamiento de aguas residuales instaladas recientemente o que se encuentran en fase de proyecto para iniciar operaciones a corto plazo en desarrollos turísticos del país bajo la asistencia de FONATUR, se ha preferido instalar digestores aerobios para la estabilización de lodos por su eficiencia en la eliminación de organismos patógenos y la sencillez en su operación (Gutiérrez, 1991).

La estabilización con cal es también un proceso muy sencillo cuyas principales ventajas son sus bajos costos y simplicidad de operación y aunque no es un método definitivo, como se mencionó en la sección 2.2.2, es una alternativa muy práctica con la que se pueden obtener buenos resultados sobre todo en plantas pequeñas, eliminando también olores desagradables.

El tratamiento térmico y el tratamiento con cloro son también métodos eficientes en la eliminación de patógenos. En este caso se consideran poco apropiados por sus altos costos. En el caso del tratamiento con cloro, el alto contenido de compuestos organoclorados tóxicos en el lodo, dificulta su disposición final.

Por su parte, el composteo de lodos residuales de origen doméstico ha sido propuesto en México anteriormente como una opción para su disposición final y así aprovecharlos como mejorador de suelos (Muñiz, 1988); sin embargo, es un método difícil de controlar en plantas que generan grandes cantidades de lodo.

Para su aprovechamiento es indispensable que la planta cuente con algún sistema para la deshidratación previa del lodo. Los factores que deciden si se utiliza el lodo como composta son:

- La posibilidad de comercializar el producto;
- disponer de grandes áreas de terreno;
- que la composta no contenga sustancias tóxicas.

El tratamiento con cal, así como las dos formas de digestión son los métodos de estabilización propuestos en este trabajo. La desinfección de lodos se considera, en la mayoría de los casos, innecesaria, por lo que no se incluirá.

Ahora bien, cuando el lodo debe ser transportado grandes distancias para su disposición final, es recomendable eliminar la mayor cantidad de líquido para minimizar el volumen que será manejado. Esta propuesta incluye, por lo tanto, sistemas para la deshidratación de lodos y métodos para su acondicionamiento.

Después de analizar las ventajas y desventajas de las diferentes alternativas para la deshidratación de lodos, se consideraron más convenientes los sistemas mecánicos por su alta eficiencia, porque su operación es relativamente sencilla, por su flexibilidad, por la rapidez de operación y porque sus costos son comparables a los costos de construcción y terreno de lechos de secado para plantas que manejan grandes volúmenes de lodos. La opción de utilizar lechos de secado no debe descartarse del todo ya que puede representar una solución adecuada en plantas pequeñas, siempre y cuando se cuente con el espacio necesario.

Los sistemas propuestos en el capítulo correspondiente son los filtros prensa, filtros banda y lechos de secado.

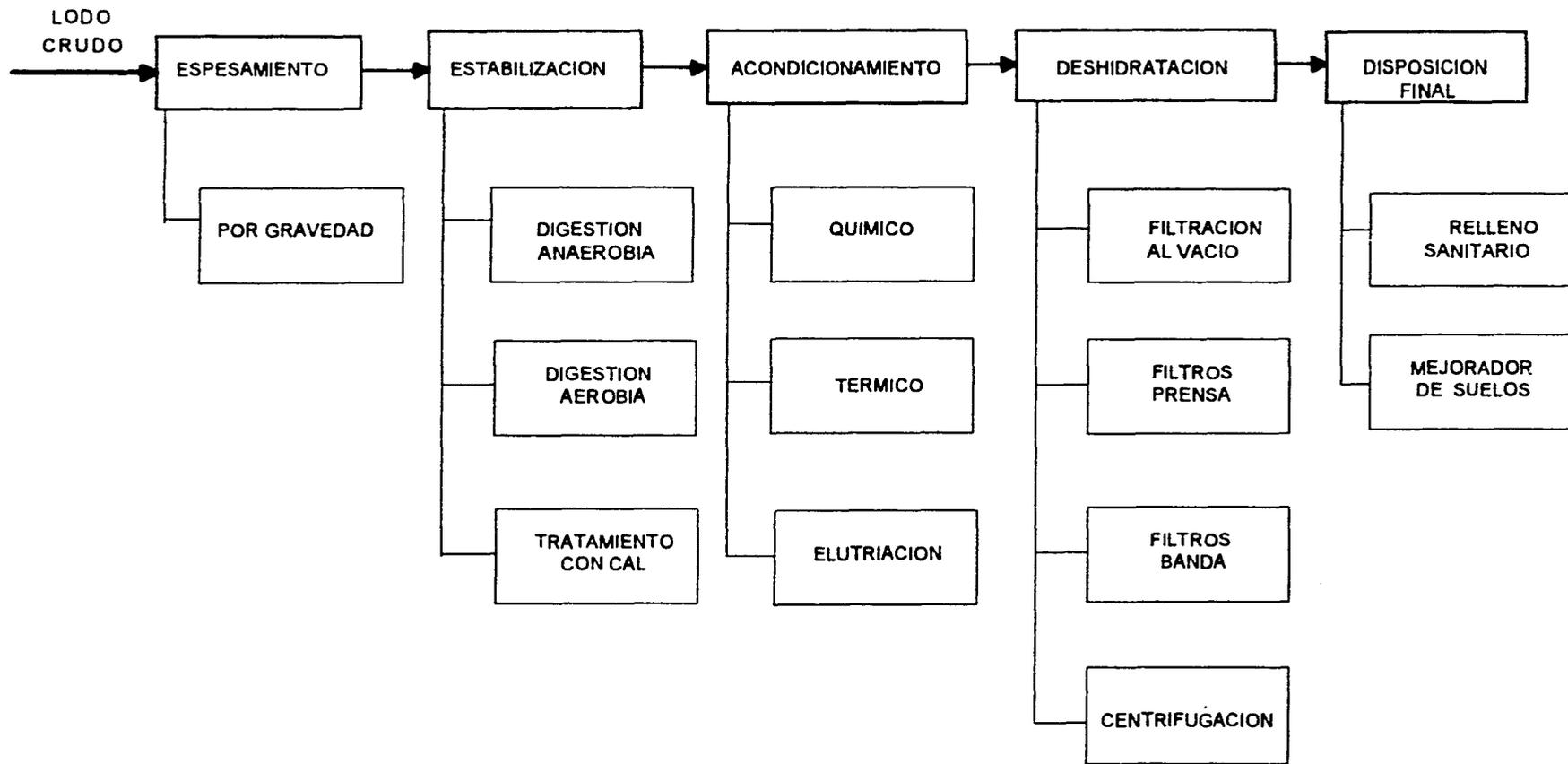
Considerando que el acondicionamiento es un tratamiento de preparación para la deshidratación, el método seleccionado dependerá en gran medida del sistema mediante el que se lleve a cabo este último proceso. En este caso, los sistemas mecánicos para deshidratación elevan considerablemente su eficiencia si el lodo se acondiciona con productos químicos o mediante tratamiento térmico, por lo que ambos métodos se consideran adecuados; sin embargo, se prefiere el acondicionamiento químico porque es más económico y por su sencillez de

operación. Por otro lado, la elutriación es un proceso que puede reducir de manera importante la cantidad de agentes químicos empleados por lo que su instalación se justifica únicamente si representa un ahorro considerable en los costos de operación por gastos en productos químicos. Al mismo tiempo, su utilización aumenta la complejidad en la operación del sistema.

Los métodos de acondicionamiento propuestos en este trabajo son la aplicación de productos químicos y la elutriación. El tratamiento térmico se considera poco apropiado por sus altos costos. El método de congelación y deshielo en lechos resulta inaplicable en nuestro país.

Respecto a la disposición final, se analizaron las diferentes opciones presentadas en el capítulo 2 y se concluyó que las mejores alternativas son las de relleno sanitario y la que propone el uso del lodo tratado como mejorador de suelos, ya que de esta manera no solo se soluciona el problema de disposición de un residuo peligroso, sino también representa un beneficio final.

La figura 3.1 muestra de manera sencilla un diagrama de bloques que incluye los sistemas de tratamiento propuestos en este trabajo como adecuados a la situación nacional actual y cuyos procedimientos de diseño, descripción de procesos y diagramas de flujo se presentan en capítulos posteriores.



75

Fig. 3.1 Alternativas para el tratamiento de lodos residuales domésticos, propuestas de acuerdo con las necesidades del país

4. ESPESAMIENTO POR GRAVEDAD

4.1 Teoría

El mecanismo que rige el espesamiento por gravedad se basa primordialmente en el comportamiento de las partículas suspendidas en procesos de sedimentación y varía principalmente de acuerdo con su naturaleza y concentración.

La *sedimentación* es la separación de partículas suspendidas más pesadas que el agua mediante la acción de la gravedad. Se clasifica fundamentalmente en los cuatro tipos siguientes, de acuerdo con la concentración de sólidos en el fluido y con la tendencia a la interacción entre partículas:

- sedimentación libre o de partículas discretas;
- sedimentación de partículas flocculantes;
- sedimentación zonal o de partículas que se obstruyen y,
- sedimentación por compresión.

La sedimentación libre ocurre en suspensiones diluidas en las que las partículas conservan sus características en cuanto a velocidad de sedimentación, comportándose como unidades independientes al no existir interacción significativa con las partículas próximas. Este tipo de sedimentación es característico en suspensiones con concentraciones de sólidos muy bajas y no se lleva a cabo en el espesamiento por gravedad (WPCF, 1987).

La sedimentación de partículas floculantes se lleva a cabo en suspensiones diluidas en las que las partículas forman agregados, incrementando su velocidad de sedimentación. Ejemplos de este tipo se presentan en sedimentadores primarios, así como en la sedimentación de aguas coaguladas químicamente.

Conforme la carga de sólidos aumenta, la velocidad de sedimentación de las partículas se reduce, debido a que la proximidad entre ellas hace que las fuerzas de cohesión y fricción obstaculizan el proceso. Las partículas tienden a permanecer en la misma posición relativa unas con otras y todas se sedimentan a una misma velocidad constante, determinada por la concentración de sólidos y la viscosidad del fluido. Este tipo de sedimentación, llamado de partículas que se obstruyen, se caracteriza por la presencia de una interfase sólido-líquido claramente definida entre la masa de partículas y el líquido clarificado.

En la sedimentación por compresión las partículas están tan cerca unas de otras que forman una estructura que sedimenta por compresión o compactación, ocasionada por el peso de las partículas que continuamente se depositan sobre ella, al mismo tiempo que se forman canales que permiten el paso del líquido desplazado hacia la zona de clarificación.

En un espesador por gravedad el lodo se separa en tres zonas: la zona superior, formada por una capa de líquido clarificado, la zona de sedimentación, que se caracteriza por tener una concentración de sólidos más o menos uniforme y, la zona de compresión, en la que la concentración de sólidos se incrementa hasta el punto de la descarga del lodo. Entre la primera y la segunda capas se distingue la interfase sólido-líquido citada, llamada comúnmente "espejo" de lodos.

El funcionamiento de un espesador por gravedad de operación continua es muy similar al de un tanque de sedimentación. El lodo se alimenta generalmente por el centro del tanque, permitiendo el asentamiento de los sólidos por efecto de la gravedad; el sobrenadante pasa sobre un vertedero a nivel de superficie para recircularse a la sección de tratamiento secundario, mientras que el lodo espesado se extrae por el fondo, de manera continua o a intervalos frecuentes para no dar tiempo a la formación de gases, ocasionada por la descomposición del residuo en condiciones anaerobias.

Uno de los parámetros de control más importantes en un espesador por gravedad es la profundidad del espejo de los lodos. Si se encuentra en un nivel bajo los tiempos de residencia serán bajos también y, consecuentemente, la concentración de sólidos en el lodo espesado será menor. Por el contrario, si el espejo de los lodos se mantiene en un nivel alto, los tiempos de residencia serán mayores originando un aumento en la concentración del lodo, pero esto favorece la descomposición biológica del lodo caracterizada por una producción excesiva de gases que provocan la flotación de sólidos. Un intervalo aceptable para tiempos de residencia, calculados como la relación entre el volumen de lodo mantenido por debajo del nivel del espejo y el volumen de lodo extraído por día, es entre 0.5 y 2 días (Qasim, 1985).

Para evaluar las características de sedimentación de un fluido es conveniente llevar a cabo pruebas de sedimentación a nivel de laboratorio con las que se obtienen gráficas, llamadas curvas de sedimentación. Con dichas pruebas se determina, generalmente, la velocidad de sedimentación en la interfase (zona de sedimentación) y el índice volumétrico de lodos. La determinación de la velocidad de sedimentación en la zona de sedimentación se explica en la sección 4.3.2.2.

El índice volumétrico de lodos (IVL) se define como el volumen en mililitros que ocupa un gramo de lodos después de permitir su sedimentación durante 30 min en una probeta graduada de 1000 ml. Se calcula de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$IVL = VL / SST \quad (4.1)$$

donde:

IVL índice volumétrico de lodos, ml/g

VL volumen que ocupa el lodo después de 30 min de sedimentación, ml/l

SST contenido de sólidos suspendidos por litro, g/l

El IVL indica la facilidad con que sedimenta un lodo; por ejemplo, se sabe que en general los lodos cuyas concentraciones iniciales se encuentran entre 800 y 3500 mg/l sedimentan fácilmente si el IVL se encuentra en un intervalo entre 35 y 150 ml/g (Ramalho, 1983).

La teoría que prevalece actualmente sobre el diseño de espesadores por gravedad se basa en la suposición de que la velocidad de sedimentación y el flujo de sólidos en la zona de sedimentación en una suspensión ideal son función únicamente de la concentración de sólidos. El flujo o carga superficial de sólidos se define como la masa total de sólidos que atraviesa una unidad de área por unidad de tiempo hacia el fondo del tanque.

Comúnmente los lodos generados durante el tratamiento de aguas residuales, particularmente con altas concentraciones de sólidos, no se comportan como una suspensión ideal; sin embargo, el efecto de la concentración supera los efectos de otros parámetros y, por consiguiente, esta teoría se considera válida para el diseño de espesadores y para analizar su funcionamiento (WPCF, 1987). Existen factores en las suspensiones reales, específicamente en lodos de aguas residuales, que afectan la operación de los espesadores; por ejemplo, la profundidad del espejo de lodo (WPCF, 1980) o el efecto de la distribución del tamaño de partículas (Desmond, 1982).

En un espesador por gravedad de operación continua, el flujo de sólidos está determinado por el efecto del asentamiento por gravedad y por la tasa de extracción del lodo espesado. Se expresa como la suma de las magnitudes de ambos procesos que se obtienen al multiplicar las velocidades respectivas por la concentración de sólidos. El flujo total de sólidos para cualquier concentración se expresa de acuerdo con la ecuación:

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

$$G_t = (C)(V) + (C)(U) \quad (4.2)$$

donde:

- G_t flujo total de sólidos, $\text{kg/m}^2\text{d}$
- C concentración de sólidos, kg/m^3
- V velocidad de sedimentación, m/d
- U velocidad de extracción de lodo, m/d

Esta ecuación muestra que el flujo total de sólidos a una velocidad de extracción de lodo fija, queda determinado únicamente por la concentración en el espesador. Una vez que la concentración se establece, la velocidad de sedimentación asociada queda automáticamente definida y, la determinación del flujo total de sólidos se limita a encontrar la concentración de sólidos en el espesador, lo cual se facilita mediante el uso de gráficas.

La ecuación 4.2 puede reescribirse de la siguiente manera:

$$G_s = G_t - (C)(U) \quad (4.3)$$

donde G_s (que equivale a CV) representa al flujo causado por el efecto de la gravedad y se denomina flujo de sedimentación. En la figura 4.1 se presentan gráficas del flujo de sedimentación contra la concentración de sólidos, a las que se superpone una línea recta, llamada línea de operación, que representa la relación $(G_t - CU)$. La concentración en el tanque debe satisfacer la ecuación 4.2 y corresponde al punto de intersección entre la línea de operación y la curva del flujo de sedimentación. La figura 4.1 muestra que hay tres posibles formas de llevar a cabo la intersección.

La figura 4.1 (c) representa condiciones de sobrecarga: el término G_a denota el flujo de sólidos aplicado al espesador y la diferencia entre G_a y G_t , la sobrecarga. En este caso el exceso de sólidos no sedimenta sino que permanece a nivel de la alimentación y es arrastrado por el efluente. La presencia de las concentraciones C_2 y C_3 es improbable debido a que la transición entre ambas debe ser continua y por lo tanto deberían presentarse concentraciones intermedias; por el contrario, se forman con facilidad capas con diferentes concentraciones que se propagan hacia

arriba hasta que se alcanzan nuevamente condiciones estables, representadas por la línea punteada cuya pendiente es la misma que la de la línea de operación (WPCF, 1987).

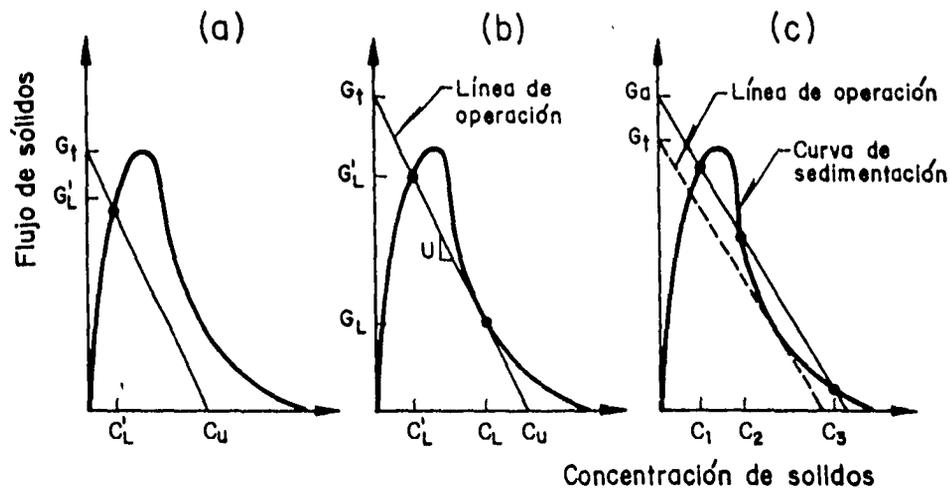


Fig. 4.1 Relación entre la curva de sedimentación y la línea de operación en un espesador por gravedad.

La figura 4.1 (b) representa condiciones de carga máxima. La línea de operación es tangente a la curva del flujo de sedimentación en el punto correspondiente a la concentración C_L . En estas condiciones no hay pérdidas de sólidos en el efluente y coexisten dos concentraciones C_L y C_L' . La concentración C_L establece el flujo máximo permisible, flujo límite o crítico, y se le llama concentración límite.

La figura 4.1 (a) representa condiciones por debajo de la carga máxima, y sólo se presenta una sola concentración, C_L' , que es proporcional a la carga aplicada. Cuando se opera bajo estas condiciones se reduce el grado de espesamiento; sin embargo, en ocasiones es conveniente si, por ejemplo, se requiere reducir el tiempo de retención de sólidos en el espesador.

Una vez que se han identificado la concentración y el flujo límite (fig. 4.1 b), se puede obtener la concentración de sólidos en el lodo espesado por medio de un balance de masa para los sólidos que atraviesan el fondo del tanque, descrito por la ecuación 4.4.

$$A(G_L + C_L U) = C_U Q_U \quad (4.4)$$

donde:

- A área del espesador, m²
- C_U concentración de sólidos en el lodo espesado, kg/m³
- Q_U tasa de extracción de lodos, m³/d
- U velocidad de extracción de lodo, m/d
- C_L concentración de sólidos límite, kg/m³
- G_L flujo de sedimentación a C_L (flujo límite), kg/m²•d

y dado que Q_U = uA la ecuación 4.4 puede reescribirse de la siguiente manera para calcular la concentración en el lodo espesado:

$$C_U = C_L + G_L/U \quad (4.5)$$

4.2 Equipo necesario

Los espesadores por gravedad son comúnmente tanques circulares parecidos a tanques de sedimentación, aunque algunas veces pueden ser rectangulares si se cuenta ya con instalaciones de este tipo. Se prefieren las unidades circulares porque presentan mayores ventajas como la facilidad para remover los lodos acumulados en el fondo y la posibilidad de extraerlos de forma continua.

El diámetro de los tanques circulares varía entre 3 y 30 m y su profundidad entre 2 y 5 m. El fondo debe estar inclinado hacia el centro con una pendiente de entre 125 y 250 mm/m, inclinación mayor que la de los clarificadores comunes, para facilitar la recolección de lodos (WPCF, 1980). Normalmente se encuentran

equipados con armaduras horizontales de movimiento rotatorio lento, llamadas rastras, fijadas a un eje central impulsado por un motor que ayuda a transportar los lodos sedimentados hacia la tolva o embudo central de lodos, de donde son descargados por bombeo. El mecanismo giratorio de las rastras es generalmente mucho más pesado que en los sedimentadores debido a que los torques de operación esperados son mayores, deben girar a una velocidad tangencial entre 3 y 6 m/min, para facilitar la liberación del agua que pudiera quedar atrapada en la estructura del lodo, sin llegar a agitarlo tanto que provoque la resuspensión de los sólidos.

El tanque puede equiparse también con un mecanismo desnatador sujeto a la flecha central en la superficie para arrastrar los sólidos que floten hacia una caja colectora de natas o espuma. La figura 4.2 muestra un espesador por gravedad circular típico.

Existen otros dispositivos especiales para mejorar el funcionamiento de los espesadores, aunque generalmente no son necesarios en lodos de agua residuales de origen doméstico.

Uno de ellos es un sistema que eleva el mecanismo giratorio por encima del nivel del espejo de lodos cuando se presentan torques extremadamente altos. Este sistema puede ser recomendable cuando se prevén muy altas viscosidades o concentraciones de sólidos, por ejemplo, lodos acondicionados térmicamente o lodos primarios más lodos acondicionados químicamente con cal (EPA, 1979).

Otro de estos dispositivos consiste en un adaptador para variar la velocidad de la rastra de acuerdo con las necesidades del sistema. Un incremento en la velocidad ayuda a liberar burbujas ocasionadas por la gasificación bajo condiciones anaerobias en la zona de compresión; sin embargo, si se lleva a cabo durante un período prolongado se reduce la concentración de sólidos en el lodo final y disminuye considerablemente la vida del mecanismo de transmisión.

Otra modalidad del equipo para facilitar la salida de gases consiste en elementos verticales, ya sea ángulos de acero o tubos de entre 0.6 y 2 m de altura fijados al brazo de la rastra dispuestos a espacios entre 15 y 46 cm, que proporcionan agitación adicional (WPCF, 1980). Cuando se espesan lodos de aguas residuales

domésticas el movimiento de la rastra normalmente proporciona un mezclado suficiente y, si no se efectúa una eficiente eliminación previa del material voluminoso, la utilización de este aditamento puede ser contraproducente (WPCF, 1987).

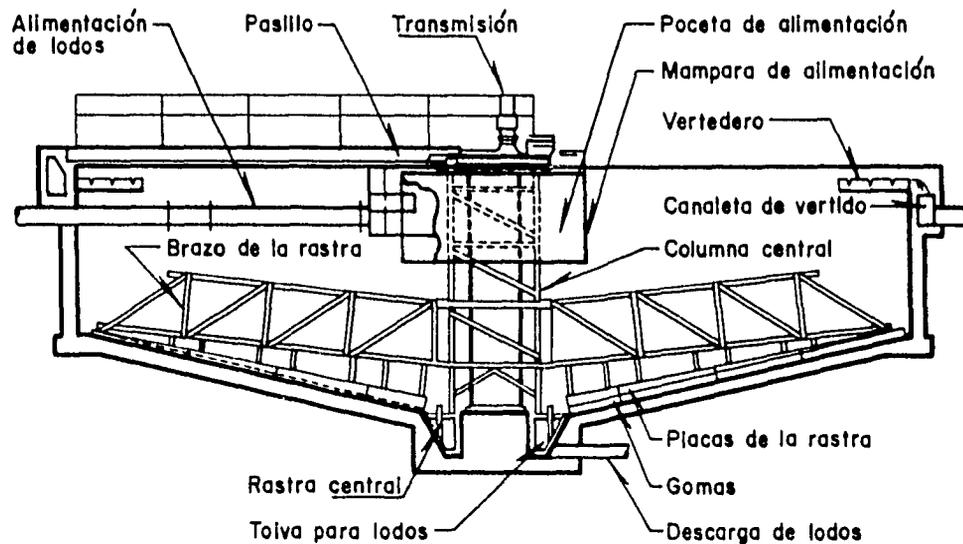


Fig. 4.2 Corte transversal de un espesador por gravedad típico

En cuanto al sistema de bombeo, las bombas más usadas son del tipo de desplazamiento positivo, como las bombas de émbolo, de pistón, de diafragma o de cavidad progresiva. Las bombas centrífugas se emplean ocasionalmente, pero sus características de flujo las hacen poco adecuadas. En cualquier caso, las bombas deben situarse tan cerca del espesador como sea posible (incluso debajo del tanque) para minimizar la tubería del lado de succión de la bomba.

4.3 Diseño

Al diseñar un espesador es importante dotarle de suficiente capacidad para que la sedimentación y compresión se lleven a cabo adecuadamente. Es necesario evaluar el proceso de sedimentación tanto en la zona de sedimentación como en la de compresión; aquel que requiera mayor área para llevarse a cabo dictaminará el tamaño del espesador. Para lodos residuales de origen doméstico, el área requerida en la zona de compresión es generalmente mayor que en la zona de sedimentación (WPCF, 1980).

Los espesadores por gravedad se diseñan fundamentalmente con base en la carga hidráulica y la carga de sólidos. Es importante determinar el área superficial mínima requerida, la profundidad del tanque y el torque de operación al que se sujetará el sistema.

4.3.1 Consideraciones de diseño

Algunos factores importantes que deben ser considerados al diseñar espesadores por gravedad son los siguientes (WPCF, 1980):

- Origen y características del lodo;
- naturaleza de los floculantes químicos, si los contienen;
- concentración de sólidos en el efluente y el impacto ocasionado por su recirculación a otras secciones de la planta;
- carga de sólidos;
- tiempo de retención de sólidos en la zona de compresión;
- nivel del espejo del lodo;
- tiempo de retención hidráulica y carga hidráulica superficial;
- tasa de extracción del lodo;
- forma del tanque incluyendo la pendiente del fondo;

- disposición física de la alimentación;
- disposición de la tubería de extracción del lodo.

Estos parámetros pueden clasificarse en tres categorías: aquellos que se refieren a la condición y características del lodo que será espesado; aquellos relacionados a la operación del espesador y, los que se refieren al diseño específico de ciertas características del espesador. A continuación se describen algunos de ellos.

4.3.1.1 Carga superficial de sólidos

La carga superficial de sólidos permisible se define como la masa de sólidos que atraviesa una unidad de área por unidad de tiempo ($\text{kg}/\text{m}^2\text{d}$); es función de la tasa de extracción de lodos espesados y de la concentración de sólidos deseada en ellos. Si se desea incrementar la concentración, la tasa de extracción de lodos y por lo tanto la carga de sólidos deben reducirse.

La cantidad de sólidos que entran al sistema puede calcularse como el producto entre el caudal y la concentración de sólidos en el influente al espesador.

4.3.1.2 Carga hidráulica

La carga hidráulica es importante por dos razones: Primero, está relacionada con la carga de sólidos y si hay un límite superior definido para la carga de sólidos, necesariamente habrá también un límite superior para la carga hidráulica. Segundo, cargas hidráulicas altas, causan un arrastre excesivo de sólidos en el efluente del espesador (sobrenadante).

Para lodos primarios se han empleado con éxito cargas hidráulicas máximas entre 1.2 y 1.3 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$ y para lodos biológicos entre 0.2 y 0.4 $\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$ (EPA, 1979). La

tabla 5.1 presenta datos de operación típicos de carga hidráulica, carga de sólidos y otros parámetros.

TABLA 4.1 DATOS DE OPERACION PARA DIFERENTES TIPOS DE LODOS EN ESPESADORES POR GRAVEDAD (EPA, 1979).

Tipo de lodo ^a	Concentración de sólidos (%)		Carga hidráulica (m ³ /m ² h)	Carga de sólidos (kg/m ² d)	Sólidos suspendidos en el efluente (mg/l)
	influyente	lodo espesado			
PRI + LA	0.6	4.7	0.326	1.67	2, 500
PRI + FP	0.3	8.6	0.760	2.25	400
PRI + FP + sales de aluminio	0.5	7.8	0.775	3.58	2, 000
LA	1.2	5.6	0.167	2.06	140
PRI + LA + sales de aluminio	0.3	5.6	1.053	2.94	1, 400

^a PRI = Lodos primarios; LA = exceso de lodos activados; FP = filtro percolador

4.3.1.3 Tipo de lodo

El espesamiento por gravedad se emplea para lodos primarios, secundarios o mezclas de ambos. Los lodos primarios sedimentan rápidamente sin la adición de coagulantes químicos y el lodo espesado es fácil de bombear. Los espesadores pueden operar con cargas de sólidos más altas debido a que pueden mantenerse almacenados durante períodos de tiempo más largos antes que se presente una liberación excesiva de gases. Dependiendo de la temperatura, los lodos primarios pueden mantenerse hasta 2 ó 4 días en el espesador; sin embargo, los tiempos de retención normales son entre 1 y 2 días (WPCF, 1980).

Los lodos secundarios, particularmente exceso de lodos activados, se caracterizan por tener una gran superficie por unidad de masa, lo que provoca bajas tasas de sedimentación y gran resistencia a ser compactados; asimismo, tienden a estratificarse mientras continúa su actividad biológica provocando que la producción de gases cause la flotación y acumulación de sólidos en la superficie.

Generalmente se espesan mezclados con lodos primarios, pero cuando esto no es posible debe considerarse que el lodo no debe permanecer en el espesador por más de 18 h y que el diámetro del espesador no debe ser mayor de 11 ó 12 m (WPCF, 1980). La concentración final de sólidos esperada se encuentra aproximadamente entre 1 y 2%.

Cuando se espesan mezclas de lodos primarios y secundarios hay que asegurarse de que la relación entre ambos sea adecuada y que permanezca tan uniforme como sea posible. A temperaturas entre 15 y 20°C es adecuada una relación de 4:1 a 6:1 entre el líquido de lodos secundarios y primarios, pero a temperaturas mayores se requiere dilución adicional (WPCF, 1987). Algunos estudios informan que si la relación entre sólidos secundarios y primarios se mantiene entre 25% y 59%, la concentración del lodo espesado permanecerá prácticamente constante; sin embargo, un incremento por encima de este intervalo causará disminuciones considerables en la concentración del lodo espesado (WPCF, 1987).

4.3.2 Area superficial

El área superficial requerida se puede estimar con base en pruebas de sedimentación con el lodo que será tratado, mediante la obtención de curvas de sedimentación y el cálculo del flujo crítico o límite (carga de sólidos, $\text{kg/m}^2 \cdot \text{d}$), o bien, si no se dispone del lodo y no se justifica la construcción de una planta piloto, mediante el empleo de resultados reportados de sistemas similares de acuerdo al tipo de lodos que serán manejados.

4.3.2.1 Determinación del área con base en datos reportados

Cuando no se dispone del lodo que será espesado es posible estimar el área del espesador con base en información de diseño y operación de instalaciones similares.

TABLA 4.2 DATOS TÍPICOS DE ESPESADORES POR GRAVEDAD PARA DIFERENTES TIPOS DE LODOS DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS (WPCF, 1980).

Tipo de lodos	Concentración de sólidos, %		Carga de sólidos, kg/m ² d
	alimentación	lodo espesado	
Primarios (PRI)	2 - 7	5 - 10	100 - 150
Filtro percolador (FP)	1 - 4	3 - 6	40 - 50
Biodisco (CBR)	1 - 3.5	2 - 5	35 - 55
Exceso de lodos activados (LA)			
LA aeración con aire	0.5 - 1.5	2 - 3	20 - 40
LA aeración con oxígeno	0.5 - 1.5	2 - 3	20 - 40
aeración extendida	0.2 - 1.0	2 - 3	25 - 40
Digeridos anaeróbicamente (primer digestor)	8	12	120
Acondicionados térmicamente			
primarios	3 - 6	12 - 15	200 - 250
PRI + LA	3 - 6	8 - 15	150 - 200
LA	0.5 - 1.5	6 - 10	100 - 150
Lodos químicos			
con cal (dosis alta)	3 - 4.5	12 - 15	120 - 300
con cal (dosis baja)	3 - 4.5	10 - 12	50 - 150
con sales de hierro	0.5 - 1.5	3 - 4	10 - 50
Mezclas			
PRI + LA	0.5 - 1.5	4 - 6	25 - 70
PRI + FP	2.5 - 4.0	4 - 7	40 - 80
PRI + CBR	2 - 6	5 - 9	60 - 100
PRI + sales de hierro	2	4	30
PRI + cal (dosis baja)	5	7	100
PRI + cal (dosis alta)	7.5	12	120
PRI + LA + sales de hierro	1.5	3	30
PRI + LA + sales de aluminio	0.2 - 0.4	4.5 - 6.5	60 - 80
PRI + sales de hierro + FP	0.4 - 0.6	6.5 - 8.5	70 - 100
PRI + sales de hierro + LA	1.8	3.6	30
LA + FP	0.5 - 2.5	2 - 4	20 - 40
Digeridos anaeróbicamente			
PRI + LA	4	8	70
PRI + LA + sales de hierro	4	6	70

^a PRI = lodos primarios; LA = exceso de lodos activados; FP = lodos de filtro percolador

Generalmente se emplean valores de carga de sólidos. La tabla 4.2 presenta una recopilación de datos típicos para diferentes tipos de lodos residuales de origen doméstico.

Al seleccionar los valores que serán utilizados como una base empírica para el diseño de espesadores es importante especificar: el tipo de lodos (si se trata de mezclas debe conocerse la proporción aproximada), el intervalo de concentraciones de sólidos esperadas del influente al espesador y, la concentración requerida en el lodo espesado de acuerdo con el tratamiento o manejo subsecuente.

El área requerida se determina dividiendo la masa de sólidos esperada por día por el valor seleccionado para la carga de sólidos de acuerdo con la tabla 4.2.

4.3.2.2 Determinación del área con base en pruebas de sedimentación.

Las pruebas de sedimentación se llevan a cabo en una probeta graduada de 1000 ml con el lodo que será estudiado, permitiendo que sedimente. Al inicio del experimento ($t=0$) la concentración del lodo es uniforme, pero poco tiempo después se forma una interfase sólido-líquido claramente definida cuya altura se medirá a intervalos de tiempo determinados. Para obtener una curva de sedimentación se gráfica la altura de la interfase contra el tiempo (figura 4.3).

Es conveniente agitar la suspensión a una velocidad de aproximadamente 5 rph para simular el efecto de la rastra mecánica utilizada en los espesadores para remover el lodo acumulado (Ramalho, 1983).

La figura 4.3 muestra que la altura de la interfase disminuye desde el inicio del experimento hasta un tiempo $t=t_1$ a velocidad constante V_s , determinada por la pendiente de la tangente que prácticamente coincide con la curva de sedimentación desde $t=0$ hasta $t=t_1$. A partir de este tiempo la velocidad de sedimentación V_c disminuye apreciablemente y queda determinada por la pendiente de la tangente en el punto C, en un tiempo $t=t_c$. En este punto, llamado punto

crítico o límite, se inicia la compresión de lodo y la velocidad de sedimentación se reduce prácticamente hasta cero. La velocidad de la interfase V_i corresponde a la pendiente de la recta tangente a cada punto en la curva de sedimentación.

Deben obtenerse curvas de sedimentación para diferentes concentraciones iniciales de sólidos suspendidos C_0 , usualmente, desde la concentración a la cual el lodo empieza a presentar características correspondientes a la zona de sedimentación hasta la máxima concentración esperada.

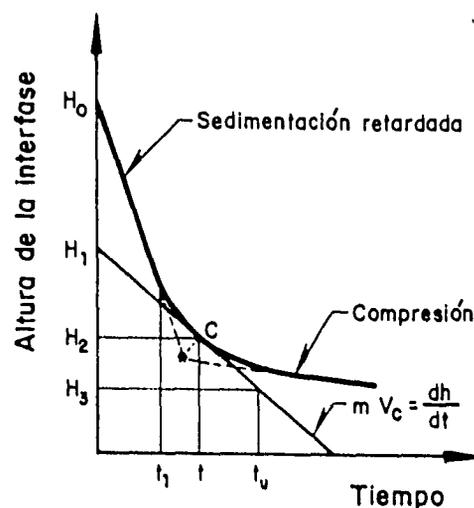


Fig. 4.3 Curva de sedimentación típica

Se calcula el área unitaria, que es igual al inverso del flujo de sólidos o carga superficial de sólidos, para diferentes valores de velocidad de la interfase y concentraciones deseadas en el lodo espesado mediante la ecuación 4.6. Con los valores obtenidos se determina el área unitaria máxima para cada combinación de concentraciones iniciales y concentraciones en el lodo espesado. Estas últimas se seleccionan comúnmente entre 0.7 y 0.9 de la concentración en la interfase en un tiempo infinito C_{∞} , que puede estimarse por extrapolación de la curva de sedimentación. La concentración de la interfase en cualquier punto se considera la relación constante del producto entre la concentración y altura de la interfase: $H_i C_i = \text{cte}$ (Eckenfelder y Ford, 1970).

$$AU = \frac{1/C_i - 1/C_u}{V_i} \quad (4.6)$$

donde:

AU área unitaria, m²d/kg

C_i concentración en la interfase, kg/m³

C_u concentración en el lodo espesado, kg/m³

V_i velocidad en la interfase, m/d

El grado en que puede ser espesado un lodo depende de las características del lodo y de algunas variables de operación. Puede estimarse de forma aproximada mediante la ecuación 4.7 (Eckenfelder y Ford, 1970).

$$C_u/C_o - 1 = K_b AU^n \quad (4.7)$$

En esta ecuación K_b y n son constantes relacionadas con las características del lodo y las condiciones de las pruebas. K_b es función de la concentración inicial de la suspensión y de la altura del cilindro en el que se llevan a cabo las pruebas; n es función únicamente de las propiedades de flujo del lodo. Para obtenerlas se selecciona el área unitaria máxima para cada combinación de C_o y C_u y se lineariza la ecuación 4.7.

$$\log [C_u/C_o - 1] = \log K_b + n \log (AU) \quad (4.8)$$

En una gráfica de log [C_u/C_o - 1] contra el log AU, la pendiente y la ordenada al origen corresponderán a n y K_b respectivamente. El log de los valores obtenidos para K_b se gráfica contra la concentración inicial.

Para encontrar el área unitaria de diseño es necesario conocer el caudal promedio y determinar la concentración inicial de diseño así como el valor de K_b correspondiente. Este último puede determinarse mediante una gráfica que relacione los valores obtenidos mediante la ecuación 4.8 y la concentración inicial de sólidos en el fluido.

Al aplicar las pruebas de sedimentación para determinar el área del espesador se considera que éste opera bajo un régimen estrictamente unidimensional, es decir, que los sólidos se distribuyen uniformemente en forma horizontal al nivel de la alimentación y que la tasa de extracción del lodo produce velocidades uniformes a través de la sección transversal del tanque (WPCF, 1980). Estas condiciones rara vez se presentan en instalaciones a gran escala por lo que es necesario aplicar un factor de corrección por escalamiento a la constante K_b , que usualmente se considera de 0.7 (Eckenfelder y Ford, 1970). El área unitaria se estima mediante la ecuación 4.7. El área del tanque se calcula mediante la ecuación 4.9.

$$A = AU [C_{od}Q] \quad (4.9)$$

donde:

- A área, m^2
- AU área unitaria, m^2d/kg
- C_{od} concentración inicial de diseño, kg/m^3
- Q caudal, m^3/d

4.3.3 Profundidad total del tanque

La profundidad total de un espesador por gravedad se basa en tres consideraciones: bordo libre del tanque, profundidad necesaria en la zona de sedimentación y profundidad necesaria en la zona de compresión y almacenamiento del lodo.

El bordo libre del tanque es la distancia vertical entre el nivel máximo de líquido y la altura de la pared del tanque. Depende principalmente del diámetro del tanque, de la estructura del puente (si es medio puente o si es puente completo), de la disposición de la tubería de alimentación y de si el espesador cuenta con sistema desnatador o no. Generalmente es suficiente una distancia entre 0.6 y 0.9 m (EPA, 1979).

La profundidad necesaria para la zona de sedimentación comprende la zona de líquido clarificado y la zona de sedimentación (ver figura 2.3). Generalmente se

requieren entre 1.2 y 1.8 m, proporcionando la mayor profundidad cuando se trata de lodos difíciles de espesar, por ejemplo exceso de lodos activados (EPA, 1979).

La profundidad en la zona de compresión debe ser suficiente para proporcionar al tanque la capacidad necesaria para que se alcance la concentración de sólidos deseada en el lodo espesado. Generalmente se requiere una profundidad mínima entre 1 y 2 m para evitar o minimizar la dilución del espejo de lodos y para mantener un margen de lodos almacenados que es útil para equilibrar fluctuaciones en la carga de sólidos y una tasa de extracción de lodos constante (WPCF, 1980).

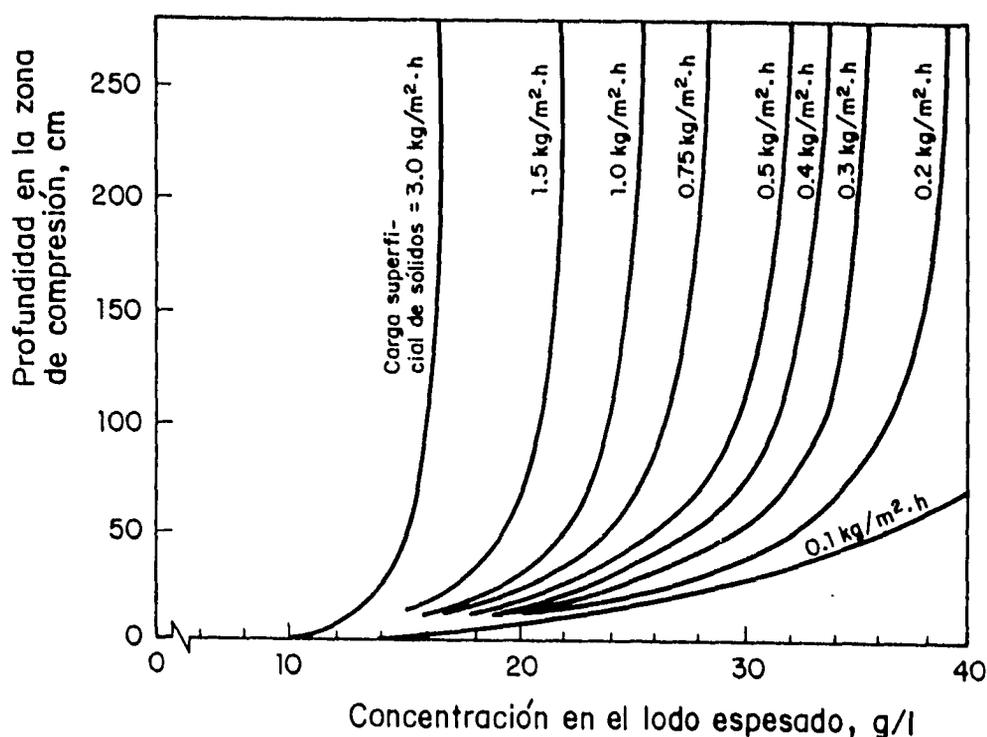


Fig. 4.4 Profundidad de la zona de compresión como función de la concentración del lodo espesado y de la carga de sólidos suspendidos (WPCF, 1980).

La cantidad de lodos que puede almacenarse en el espesador es función de la temperatura, de la cantidad de sólidos biológicos y de su estabilidad. Si la temperatura se encuentra entre 22 y 28°C y el lodo contiene cantidades considerables de sólidos biológicamente activos, la cantidad de lodo almacenado y,

por consiguiente, la concentración de sólidos en el lodo espesado deben ser menores para prevenir excesiva flotación de sólidos ocasionada por la liberación de gases.

La figura 4.4 muestra el efecto de la concentración del lodo espesado y de la carga de sólidos sobre la profundidad necesaria en la zona de compresión de un espesador por gravedad.

Una vez que se ha determinado el área del espesador es posible estimar la profundidad necesaria para la zona de compresión mediante la ecuación siguiente:

$$H_C = \frac{M_L}{(C_C)(\delta)(A)} \quad (4.10)$$

donde:

- H_C Profundidad necesaria en la zona de compresión, m
- M_L Cantidad de lodo alimentado, kg
- C_C Concentración promedio de sólidos en la zona de compresión, kg/kg
- δ Densidad aproximada del lodo, kg/m³
- A área del espesador, m²

4.3.4 Torque requerido

En un espesador por gravedad se produce un torque ocasionado por la resistencia que ofrece el lodo que se acumula en el fondo del tanque al movimiento de la rastra mecánica. En una unidad circular el torque es igual al producto de la suma de las fuerzas sobre las placas de la rastra por la distancia perpendicular al centro de fuerzas. El torque de operación se calcula mediante la ecuación 4.11.

$$T = K r^2 \quad (4.11)$$

donde:

- T torque, mkgf
- K constante, kgf/m

r radio del espesador, m

La constante K es función del material que se espesa. La tabla 4.3 presenta valores de K para diferentes tipos de lodos.

El sistema debe diseñarse considerando que el torque en la estructura de la rastra mecánica y en el motor que la mueve debe ser suficiente para vencer la resistencia que se presente. El torque de operación normal no debe ser mayor que el 10% del valor de torque correspondiente a la capacidad máxima del equipo de transmisión. Si se opera de forma continua con torques mayores que el 40-50% de dicho valor, se disminuye de forma importante la vida útil del mecanismo (WPCF, 1980).

La velocidad tangencial de la rastra es función del diámetro del espesador. Normalmente se mantiene entre 0.8 y 0.1 m/s, considerablemente mayor que las velocidades empleadas en sedimentadores (WPCF, 1987).

TABLA 4.3 VALORES TÍPICOS DE LA CONSTANTE K PARA CALCULAR EL TORQUE EN EL DISEÑO DE ESPESADORES POR GRAVEDAD (EPA, 1979).

Tipo de lodo ^a	K (kgf/m)
PRI (poca arena)	44.7
PRI (con arena)	59.6
PRI + cal	59.6 - 89.4
LA (aire)	29.8
LA (oxígeno)	29.8
Filtro percolador	29.8
Lodos con acondicionamiento térmico	119.2
PRI + LA	29.8 - 44.7
PRI + FP	29.8 - 44.7

^a PRI = lodos primarios; LA = exceso de lodos activados; FP = lodos de filtro percolador

4.4 Operación y mantenimiento

La correcta operación y mantenimiento de los espesadores son factores decisivos para asegurar su buen funcionamiento y evitar afectar otras secciones de la planta;

por ejemplo, un lodo con baja concentración de sólidos favorece la sobrecarga hidráulica en el digestor, mientras que cuando se recircula el efluente con una concentración muy alta de sólidos suspendidos, ocasiona una sobrecarga importante en el proceso de tratamiento secundario.

Algunas consideraciones importantes en la operación de espesadores por gravedad son: el arranque del proceso, la alimentación de lodo, el manejo de la espuma, el nivel del espejo de lodos, el bombeo del lodo espesado, la septicidad del lodo, y las condiciones de sobrecarga.

Antes de arrancar el espesador es importante revisar que el equipo esté debidamente conectado, que el mecanismo giratorio funcione en el sentido correcto, que los dispositivos de alarma para condiciones de sobrecarga se encuentren en buen estado, etc. Si se detiene la operación del espesador es importante vaciarlo, limpiarlo e iniciar la operación con agua antes de alimentar lodo nuevamente, para evitar sobrecargarlo. Una vez que el lodo se alimenta es necesario esperar a que se acumule suficiente lodo en el fondo del tanque para sellar completamente la tolva de lodos antes de empezar a extraerlo.

La entrada al espesador debe diseñarse de manera que se minimice la turbulencia en la poceta central de alimentación. La mayoría de los espesadores para lodos de aguas residuales domésticas utilizan alimentadores de fondo que proporcionan un flujo vertical ascendente hacia la poceta central, que se distribuye radialmente con baja turbulencia (WPCF, 1987). La alimentación de lodo debe ser tan continua como sea posible y estar libre de materiales voluminosos. Debe evitarse la entrada de aire para reducir la formación de espuma.

El nivel del espejo de lodos debe mantenerse a poca distancia por debajo del fondo de la poceta de alimentación, normalmente a una profundidad entre 0.3 y 2 m medidos sobre la pared lateral del tanque; la profundidad mayor está asociada a temperaturas menores y a tanques más profundos (WPCF, 1987).

Cuando se opera con tiempos de retención prolongados puede acumularse en la superficie un exceso de espuma que en ocasiones es difícil de manejar. En otras ocasiones el problema se presenta porque la espuma removida en la superficie de los sedimentadores se envía al espesador, lo cual no es recomendable porque

generalmente el equipo no cuenta con la capacidad suficiente para manejar grandes cantidades de espuma adicional. Este problema puede reducirse rociando agua sobre la espuma, cerca de la caja colectora de espuma o natas, manteniéndose con ello suave y fácil de bombear; si la acumulación de espuma se presenta en grado extremo, puede ser necesario succionarla mediante una bomba de vacío.

Otro problema que se presenta al almacenar el lodo durante un tiempo prolongado es la flotación de sólidos, ocasionada por la descomposición anaerobia del residuo, con la correspondiente liberación de gases. Se generan olores desagradables y se presenta un aumento en la concentración de sólidos del efluente y una reducción en la concentración de sólidos del lodo espesado. Estas condiciones pueden remediarse a corto plazo mediante la aplicación de agentes que inhiben la actividad bacteriana como el cloro o el peróxido de hidrógeno; sin embargo, es mejor prevenir esta situación mediante la aeración o dilución del lodo en la corriente de alimentación, tomando en cuenta que el sobreflujo no exceda una carga hidráulica de $32 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ aproximadamente (WPCF, 1987).

Cuando se recircula el efluente a la sección de tratamiento secundario es importante considerar que las concentraciones de sólidos suspendidos y de materia orgánica medida como DBO en el efluente del espesador no deben ser mayores que las del influente del sistema para tratamiento secundario. Si es necesario pueden aplicarse coagulantes químicos o polímeros catiónicos para aumentar la captura de sólidos.

La operación del espesador se ve afectada cuando se presenta abultamiento de lodos. Se le llama "lodos abultados" a los lodos activados que sedimentan deficientemente a causa del crecimiento de organismos filamentosos que presentan agua enlazada en su superficie y que queda atrapada en los flóculos de bacterias; dichos lodos presentan valores de IVL mayores que 200-300 ml/g, provocan que el nivel del espejo de lodos se eleve rápidamente y, por consiguiente, disminuye la concentración de sólidos en el lodo espesado. Generalmente los lodos abultados no se generan en el espesador y este problema debe ser corregido en otra sección de la planta.

Es importante extraer el lodo espesado en forma continua para hacer más efectiva la operación, pero si es necesario bombeo intermitente lo más recomendable es

hacerlo a intervalos frecuentes y cortos durante poco tiempo. Entre más uniforme sea la extracción del lodo se requerirán menos variaciones en el nivel del espejo de lodos para mantener un promedio adecuado en la concentración del lodo espesado.

El mantenimiento de un espesador es esencialmente el mismo que requiere un sedimentador; debe ser regular y suficiente para garantizar su buen funcionamiento. Es muy importante mantener en buen estado los sistemas de bombeo de la alimentación y del lodo espesado. Deben limpiarse diariamente las paredes del tanque con una escoba de goma y revisar el nivel del lodo acumulado, el buen funcionamiento del motor, la presencia de ruidos inusuales, etc. El mantenimiento semanal incluye: verificar el nivel de los aceites en la maquinaria, revisar los interruptores de control, los drenes de condensación y eliminar la humedad acumulada; examinar visualmente el sistema desnatador para asegurar que haga contacto adecuadamente con la mampara y la caja colectora de espuma.

El mantenimiento mensual comprende ajustar las cadenas y bandas del sistema y revisar el estado del mecanismo desnatador.

El mantenimiento anual comprende: desarmar el mecanismo de transmisión, revisar los sellos y engranes, cuyas superficies pueden estar dañadas debido a la corrosión, sustituir las piezas que lo requieran. El tanque debe ser vaciado y limpiado junto con todas las partes del sistema que se mantienen sumergidas en el lodo.

5. ESTABILIZACION

Los procesos para la estabilización de lodos se llevan a cabo para disminuir el contenido y la actividad de los organismos patógenos y reducir el material orgánico presente. Además, reducen los malos olores y minimizan las condiciones favorables para la descomposición biológica del residuo.

Este capítulo presenta la descripción y diseño de tres métodos para la estabilización de lodos: digestión anaerobia, digestión aerobia y estabilización con cal. Con ellos es factible considerar la utilización de los lodos tratados más que su mera disposición final.

5.1 Digestión anaerobia

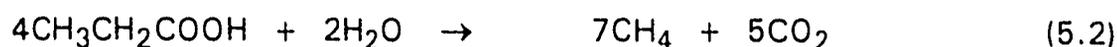
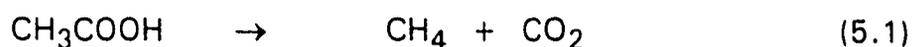
La digestión anaerobia consiste en la descomposición de materia orgánica en ausencia de oxígeno molecular mediante la acción de microorganismos. Se aplica a

lodos primarios, biológicos, químicos o mezclas de ellos, de preferencia espesados previamente.

5.1.1 Principios microbiológicos del proceso

Los microorganismos causantes de la descomposición anaerobia de material orgánico se dividen en dos grupos. El primer grupo hidroliza y fermenta compuestos orgánicos complejos (proteínas, lípidos, celulosa, etc.) a ácidos orgánicos simples, principalmente ácido acético, ácido propiónico y ácido láctico. Se compone de bacterias facultativas (aquellas que son capaces de degradar sustratos tanto en presencia como en ausencia de oxígeno) y bacterias anaerobias (aquellas que degradan sustratos únicamente en ausencia de oxígeno) que en conjunto son llamadas formadoras de ácidos o acidogénicas.

El segundo grupo de microorganismos convierte los ácidos orgánicos formados por el primero en gas metano (sumamente insoluble), dióxido de carbono, agua y trazas de otros gases. Las bacterias responsables de esta conversión son estrictamente anaerobias y se les conoce como bacterias formadoras de metano o metanogénicas. Dentro de este grupo existen varios subgrupos, cada uno de los cuales degrada un sustrato específico. Las bacterias más importantes son aquellas que degradan el ácido acético y el ácido propiónico. Estas transformaciones se llevan a cabo principalmente mediante las reacciones ilustradas en las ecuaciones siguientes (Benefield y Randall, 1980):



Además de la formación de metano, durante el proceso de digestión anaerobia actúan muchos otros grupos de bacterias facultativas y anaerobias que utilizan como sustrato distintos iones orgánicos presentes en el lodo; por ejemplo, se lleva

a cabo la reducción del ión sulfato SO_4^{2-} a ión sulfuro S^{2-} y la reducción de nitratos a nitrógeno N_2 (desnitrificación).

Las bacterias metanogénicas se caracterizan por sus bajas tasas de crecimiento, por su sensibilidad a pequeñas fluctuaciones en pH, concentración de sustrato y temperatura y, porque su metabolismo se inhibe a determinada concentración de algunos constituyentes tóxicos, como metales pesados o sulfuros. En contraste, las bacterias acidogénicas son capaces de sobrevivir en un amplio intervalo de condiciones ambientales, por lo que no es raro que un proceso de digestión anaerobia se desestabilice con relativa facilidad cuando fluctúan las condiciones de operación o la carga del reactor. Cuando, ésto sucede las bacterias formadoras de metano no son capaces de degradar los ácidos orgánicos tan rápidamente como se van produciendo, lo que provoca la caída del pH y, por consiguiente, un nivel más alto en la inhibición del metabolismo de las bacterias metanogénicas. Bajo estas condiciones es muy probable que el proceso se desestabilice y falle temporalmente.

Los tiempos mínimos promedio de retención celular, θ_c^M , de las bacterias metanogénicas se encuentran entre 3 y 10 días, mientras que los de las bacterias aerobias se encuentran entre 6 y 10 horas (Metcalf y Eddy, 1979). Esto confirma que sólo una pequeña parte del residuo orgánico degradable se sintetiza en nuevas células y el resto se transforma en metano y dióxido de carbono. Cuando éstos se producen en cantidades suficientes, como ocurre generalmente con lodos de aguas residuales domésticas, pueden utilizarse para hacer funcionar motores de gas o quemarse para calentar el lodo durante la digestión.

Para que un digestor anaerobio opere apropiadamente es necesario mantener el sistema en equilibrio dinámico, es decir, la rapidez de formación de ácidos orgánicos simples debe ser igual a su rapidez de utilización por las bacterias metanogénicas.

Con el fin de establecer y mantener dicho equilibrio el contenido del reactor deberá carecer de oxígeno disuelto y estar libre de materiales tóxicos que inhiban el metabolismo de las bacterias metanogénicas (ver sección 5.1.3.6). El líquido circundante debe encontrarse a un valor de pH entre 6.6 y 7.6 y debe existir suficiente alcalinidad para asegurar que éste no descienda por debajo de 6.2, ésto es, aproximadamente entre 1000 y 5000 mg de CaCO_3/l para mantener una

concentración de ácidos volátiles inferior a 250 mg/l (Metcalf y Eddy, 1979). La temperatura debe mantenerse entre 30 y 40°C si el proceso se lleva a cabo en el intervalo mesofílico, o entre 50 y 60°C en el intervalo termofílico (WPCF, 1985). La tabla 5.1 resume las condiciones óptimas a las que debe mantenerse el reactor para que la digestión anaerobia se lleve a cabo adecuadamente.

TABLA 5.1 CONDICIONES OPTIMAS PARA EL TRATAMIENTO ANAEROBIO DE RESIDUOS.

Temperatura óptima:	
intervalo mesofílico:	30 - 40 °C
intervalo termofílico:	50 - 60 °C
Condiciones anaerobias	
Nutrientes biológicos en cantidades suficientes:	Nitrógeno Fósforo otros
pH óptimo:	6.6 - 7.6
ausencia de materiales tóxicos	

La sensibilidad de las bacterias metanogénicas, aunada a sus bajas tasas de crecimiento, contribuye a que en un sistema anaerobio se requieran períodos de tiempo relativamente largos para establecer el equilibrio.

5.1.2 Descripción del proceso

La digestión anaerobia se efectúa en reactores cerrados, a los que se les proporcionan las condiciones favorables para la descomposición biológica de residuos en ausencia de oxígeno molecular. Puede llevarse a cabo en diferentes modalidades que se describen a continuación: digestión convencional, digestión de alta tasa y digestión en dos etapas.

5.1.2.1 Digestión convencional

La digestión convencional se lleva a cabo en un reactor estático, cerrado, comúnmente de forma cilíndrica y con el fondo inclinado hacia el centro. El lodo se alimenta por uno de los costados del tanque en la zona de digestión activa de lodo; al no haber mezclado se forman diferentes capas: en la parte superior se acumula el gas desprendido, que posteriormente se extrae para su almacenamiento o utilización; el lodo se separa en capas de espuma, líquido clarificado que generalmente se recircula a la sección de tratamiento secundario, lodo en fase de digestión activa y, en el fondo, lodo digerido.

Esta forma de digestión anaerobia se caracteriza porque los residuos se alimentan de forma discontinua, por la ausencia de mezclado y por las bajas cargas orgánicas del digesor. Requiere tanques de gran volumen debido a que la estratificación disminuye el volumen neto utilizado y a los tiempos de retención elevados (entre 30 y 60 días). La digestión convencional se recomienda únicamente en plantas que manejan caudales menores a 40 l/s (WPCF, 1985).

5.1.2.2 Digestión de alta tasa

La digestión de alta tasa se caracteriza por proporcionar al sistema calentamiento y mezclado adicional, por el espesamiento previo y por la alimentación uniforme de los residuos. Estas condiciones contribuyen a crear un ambiente homogéneo y así favorecer la degradación biológica, la reducción del volumen requerido y la estabilidad del proceso.

El calentamiento incrementa la tasa de crecimiento de los microorganismos, por lo tanto, la velocidad de digestión y producción de metano. La figura 5.1 muestra que existen dos intervalos de temperatura en los que este fenómeno se intensifica: entre 30 y 40°C (mesofílico) y, entre 50 y 60°C (termofílico).

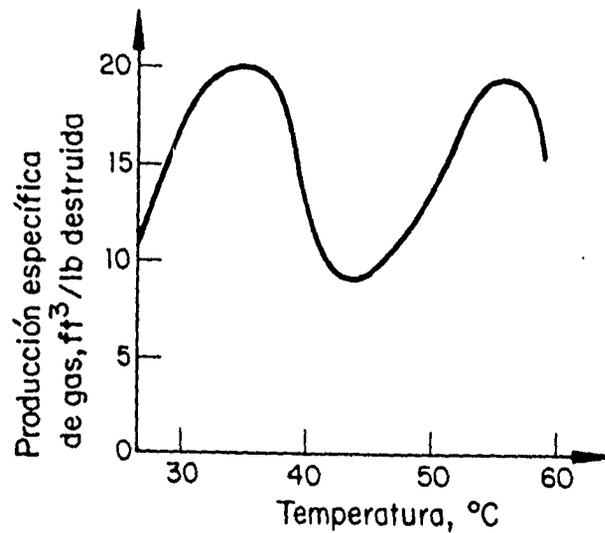


Fig. 5.1 Producción específica de gas como función de la temperatura (WPCF, 1985).

La digestión termofílica ofrece algunas ventajas sobre la digestión mesofílica: incrementa la velocidad de reacción en el digestor, por lo que se reducen los tiempos de retención; aumenta la destrucción de patógenos y mejora las condiciones para la deshidratación de lodos digeridos. Sin embargo, el consumo de energía se eleva de forma importante, produce un sobrenadante de baja calidad con altas concentraciones de materia disuelta y es un proceso menos estable debido a que los microorganismos termofílicos son más sensibles a variaciones de las condiciones ambientales que los mesofílicos. La digestión anaerobia termofílica es poco empleada (EPA, 1979; WPCF, 1985).

El calentamiento puede efectuarse mediante quemadores sumergidos, inyección de vapor, o intercambiadores de calor internos o externos. Estos últimos son los más empleados por su flexibilidad y por la sencillez de su mantenimiento.

El mezclado se lleva a cabo para lograr varios propósitos: homogeneizar la temperatura, dispersar el sustrato para aumentar el contacto con la biomasa activa, reducir la formación de espuma, diluir la concentración de sustancias tóxicas o pH adverso, incrementar el volumen neto utilizado del reactor y facilitar la separación de los gases (EPA, 1979). Se efectúa mediante mezcladores mecánicos, recirculación de gas o bombeo de lodo digerido.

El mezclado mecánico por medio de impulsores, propulsores o turbinas es poco empleado para lodos de aguas residuales domésticas (EPA, 1979). El mezclado por recirculación de gas se efectúa mediante difusores de fondo o un liberador para burbujas de aproximadamente 0.3 m de diámetro, es el método más empleado (WPCF, 1985). La recirculación de lodos digeridos requiere de una bomba externa de alta eficiencia para alimentarlos tangencialmente a través de entradas localizadas alrededor del digestor. En cualquiera de los tres métodos la eficiencia de mezclado depende fundamentalmente de la energía suministrada, pero en el caso de recirculación de lodos el tamaño del digestor y la viscosidad del lodo se consideran factores importantes. El sistema de mezclado debe operar en coordinación estrecha con el precalentamiento del lodo crudo.

El espesamiento previo es necesario porque al bajar el volumen de líquido se reducen el volumen del digestor y el calor requerido, además de mejorar la degradación de sólidos orgánicos durante la digestión. Si se recircula el líquido separado del espesador a la sección de tratamiento secundario, el efecto adverso es menor que si se enviara el sobrenadante del digestor ya que contiene menos sólidos disueltos y en suspensión. Sin embargo, si se excede el espesamiento hasta alcanzar concentraciones de sólidos por encima de 6-10% en la concentración de sólidos se originan ciertos problemas en la operación del digestor (EPA, 1979). El mezclado puede ser deficiente debido al incremento en la viscosidad, o se puede llegar a inhibir la actividad de las bacterias metanogénicas si se incrementa la concentración de sustancias tóxicas.

La alimentación en un digestor de alta tasa se lleva a cabo de forma continua o a intervalos frecuentes y regulares (por ejemplo, cada dos horas) para ayudar a mantener condiciones homogéneas en el reactor. Para minimizar el impacto a los microorganismos debe alimentarse el residuo en forma uniforme y, si es posible, en varios puntos del tanque tratando de mantener una carga orgánica constante, sin

llegar a una excesiva carga hidráulica que disminuirá el tiempo de retención, diluirá la alcalinidad necesaria para amortiguar el sistema y requerirá energía adicional para el calentamiento.

5.1.2.3 Digestión en dos etapas

La digestión anaerobia en dos etapas se lleva a cabo mediante dos reactores operando en serie. El primero es un reactor totalmente mezclado, similar a un digestor de alta tasa; el segundo es un tanque similar a un digestor convencional en el que se permite la sedimentación del lodo digerido y su separación del gas. En el segundo digestor la degradación de material orgánico y por ende la producción de metano se reducen a valores despreciables. La figura 5.2 presenta un diagrama de flujo de un sistema para digestión anaerobia de lodos en dos etapas.

Con este tipo de digestión es posible aprovechar al máximo el volumen del primer digestor, optimizando el proceso. El segundo reactor proporciona capacidad de reserva para digestión y puede utilizarse para el almacenamiento de lodo digerido.

La digestión anaerobia en dos etapas funciona exitosamente para la digestión de lodos primarios; sin embargo, en ocasiones la compactación del lodo en el digestor de separación es poco eficiente, consecuentemente, se producen lodos digeridos muy diluidos y un sobrenadante con altas concentraciones de sólidos en suspensión. La causa principal en la mayoría de los casos es la digestión incompleta en el primer reactor y, por consiguiente, la liberación de burbujas de gas en el segundo tanque que provocan flotación de sólidos, aunada a la alta proporción de partículas finas difíciles de sedimentar ocasionada por el mezclado continuo en el primer digestor. La sedimentación deficiente de lodos digeridos por vía anaerobia se incrementa si se trata de lodos biológicos y/o químicos que contienen floculantes que contribuyen a la reducción del tamaño de partículas durante la digestión. La tabla 5.2 presenta características de lodos estabilizados por digestión anaerobia mesofílica en dos etapas.

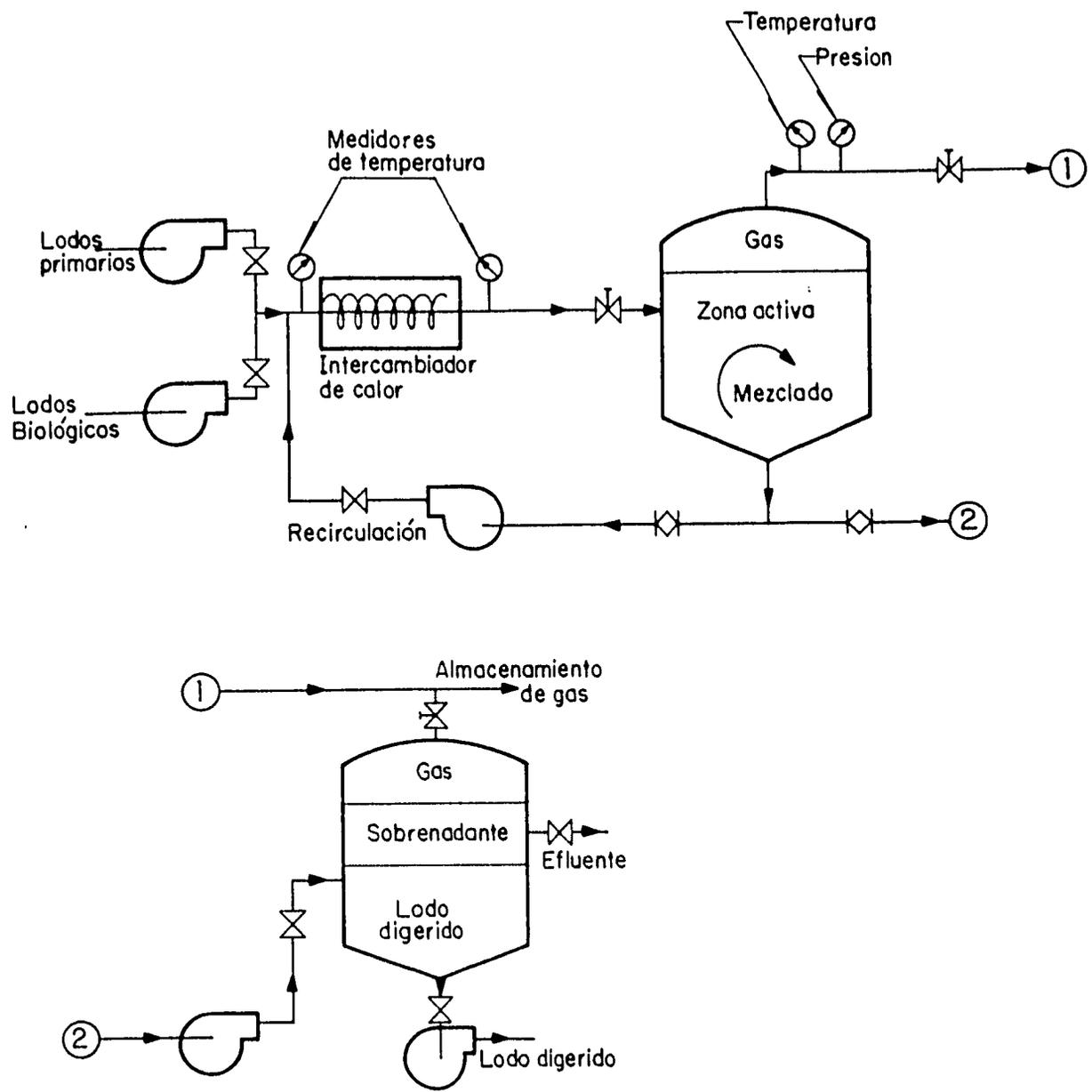


Fig. 5.2 Diagrama de flujo de un proceso de digestión anaerobia en dos etapas

TABLA 5.2 VALORES TÍPICOS DE ALGUNAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LODOS EN UN SISTEMA DE DIGESTIÓN ANAEROBIA MESOFÍLICA EN DOS ETAPAS (WPCF, 1985).

Parámetro	Concentración, mg/l ^a			
	Lodo crudo	Lodo en digestión activa	Efluente	Lodo digerido
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 fijos	9000	6600	3310	12300
carbohidratos	9680	1550	1020	3100
lípidos	8310	2075	1321	3490
carbono orgánico	15450	6950	4440	10910
proteínas	18286	11200	6580	17200
nitrógeno amoniacal	213	546	618	691
nitrógeno orgánico	1346	879	540	1455
nitrógeno total	1559	1425	1182	2146

^a excepto pH

5.1.3 Consideraciones de diseño

Los parámetros más importantes que controlan el diseño y la operación de un proceso de digestión anaerobia son: la capacidad del digestor, el calentamiento y mezclado si se requieren, la producción y utilización del gas, la calidad del sobrenadante y las características del lodo. A continuación se describe el efecto y la importancia de algunos de ellos, así como los factores que influyen en su determinación.

5.1.3.1 Volumen del digestor

La determinación del volumen de digestión es de primordial importancia, ya que debe ser suficiente para prevenir que el proceso falle bajo cualquiera de las condiciones esperadas y para asegurar que el lodo crudo sea estabilizado "adecuadamente". El nivel adecuado de estabilización debe definirse en cada caso de acuerdo con el tratamiento y forma de disposición subsecuentes. Antiguamente se consideraba que el lodo se estabilizaba adecuadamente mientras el digestor permaneciera en estado de equilibrio y no se detuviera la producción de metano; sin embargo, desde que ha aumentado la disposición en tierra de lodos tratados se requieren niveles de estabilización más estrictos. Para prevenir el desequilibrio del proceso debe asegurarse que la relación entre ácidos orgánicos acumulados y alcalinidad no sea mayor que 0.5 (EPA, 1979).

TABLA 5.3 PARAMETROS DE DISEÑO PARA UN PROCESO DE DIGESTION ANAEROBIA MESOFILICA (WPCF, 1985).

Parámetro	Digestión convencional	Digestión de alta tasa
Tiempo de retención celular, días	30-60	15-20
Carga orgánica, kg/m ³ d	0.64-1.6	1.6-3.7
Volumen por persona, m ³ /persona		
lodos primarios	0.06-0.08	0.03-0.06
primarios + FP	0.11-0.14	0.07-0.09
primarios + LA	0.11-0.17	0.07-0.11
Conc. esperada en el lodo digerido, % sólidos secos	4-6	4-6

FP lodos generados en filtro percolador
 LA exceso de lodos generados en sistemas de lodos activados

Para establecer el volumen del digestor deben considerarse parámetros como el tiempo de retención celular y la carga orgánica. La tabla 5.3 presenta valores

típicos de estos parámetros para digestores convencionales y de alta tasa en el intervalo mesofílico para lodos de origen doméstico.

También se han utilizado criterios de carga empíricos, como el volumen requerido por persona por día. Sin embargo, este parámetro incluye implícitamente otros parámetros importantes como: la cantidad de residuos generados por persona, el porcentaje de remoción de sólidos volátiles durante el tratamiento primario y/o secundario, la facilidad para la digestión del lodo, etc., que varían ampliamente entre un caso y otro. Los valores presentados en la tabla 5.3 deben emplearse únicamente para una primera estimación del volumen de digestión.

La carga orgánica se define como la cantidad de material orgánico en el lodo crudo que se alimenta a un cierto volumen del reactor por unidad de tiempo. Es un parámetro más empleado que el criterio per cápita para la determinación del volumen de digestión, aunque no siempre se relaciona de forma directa con los microorganismos responsables de la digestión.

Tiempo de retención celular

El tiempo de retención celular es el tiempo promedio que permanece en el sistema una unidad de masa de microorganismo, definido como la relación entre la masa total de sólidos en el sistema y la cantidad de sólidos extraídos por día. Este parámetro es el más importante en la determinación del volumen del digestor.

En un sistema sin recirculación el tiempo de retención celular es igual al tiempo de retención hidráulica. Si hay recirculación de lodos digeridos y/o espesados el tiempo de retención celular será mayor que el tiempo de retención hidráulica. La recirculación es característica de la digestión anaerobia en dos etapas.

El tiempo de retención celular que definirá el tamaño requerido por el reactor debe ser suficiente para que los microorganismos puedan reproducirse, y de esta manera sean capaces de reemplazar las células perdidas en el lodo extraído y de ajustar el tamaño de la población para adecuarse a posibles fluctuaciones en la carga

orgánica. Al tiempo de retención celular mínimo que necesitan los microorganismos para degradar los diferentes sustratos se le llama tiempo de retención celular crítico, θ_c^M , y difiere para los diversos grupos de bacterias presentes en el lodo; por ejemplo, aquellas que degradan lípidos se reproducen más lentamente que las que degradan celulosa y por lo tanto requieren un θ_c^M mayor.

TABLA 5.4 VALORES DE TIEMPO DE RETENCIÓN CELULAR CRÍTICO, θ_c^M , PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE ALGUNAS SUSTANCIAS (EPA, 1979).

Sustrato	θ_c^M , días			
	35°C	30°C	25°C	20°C
Acido acético	3.1	4.2	4.2	-
Acido propiónico	3.2	-	2.8	-
Acido butírico	2.7	-	-	-
Acidos grasos	4.0	-	5.8	7.2
Hidrógeno	0.95 ^a	-	-	-
Lodos de aguas residuales ¹	4.2	-	7.5	10.0
Lodos de aguas residuales ²	2.6	-	-	-

- No se tiene dato

a Valor a 37°C

1 Valores calculados con base en procesos cinéticos

2 Estudio en planta piloto

Si el tiempo de retención celular se reduce por debajo del θ_c^M , el sistema deja de producir metano por insuficiencia de bacterias metanogénicas. La tabla 5.4 presenta algunos valores del tiempo de retención celular crítico para la degradación de distintos sustratos. En ella se puede observar que al aumentar la temperatura se reduce el θ_c^M , por consiguiente aumenta la producción específica de gas.

Generalmente se requiere un tiempo de retención celular de cuando menos 10 días para que un proceso de digestión anaerobia mesofílica de alta tasa funcione adecuadamente (aproximadamente a 35°C); sin embargo, la mayoría de los digestores con estas características operan sobre 15 días de tiempo de retención celular para asegurar más estabilidad y control del proceso (WPCF, 1985). La tabla 5.5 presenta valores recomendados de tiempo de retención celular para digestores anaerobios que operan con otras temperaturas.

TABLA 5.5 TIEMPO DE RETENCION CELULAR RECOMENDADO PARA DIGESTORES DE ALTA TASA A DIFERENTES TEMPERATURAS (EPA, 1979).

Temperatura de operación, °C	Tiempo de Retención Celular, d	
	Mínimo, (θ_c^M)	Sugerido para el diseño, (θ_{cd})
18	11	28
24	8	20
29	6	14
35	4	10
40.5	4	10

Benefield y Randall (1980) proponen un modelo cinético para un reactor completamente mezclado sin recirculación, cuyo comportamiento se aproxima al de los digestores de alta tasa o el primer digestor en un proceso de dos etapas, para los que se puede estimar el θ_c^M mediante la ecuación siguiente.

$$1/\theta_c^M = Y [kS_0/(K_S + S_0)] - k_d \quad (5.3)$$

donde:

- θ_c^M Tiempo de retención celular crítico, d
- Y Coeficiente de rendimiento, kg/kg
- k tasa máxima de utilización de sustrato específico, d^{-1}
- S_0 concentración de sustrato en el influente, kg/m^3
- K_S constante de saturación, kg/m^3
- k_d coeficiente de decaimiento, d^{-1}

Lawrence (1971) reporta para lodos de aguas residuales domésticas valores de 0.04 y 0.015 d^{-1} para los parámetros Y y k_d respectivamente. O'Rourke (1968) reporta valores para k de 6.67 d^{-1} y para K_S 2224 mg/l medidos como DQO a 35°C; estas cifras deben ser corregidas cuando la digestión se lleve a cabo a temperaturas menores de acuerdo con las ecuaciones 5.4 y 5.5 que son válidas entre 20 y 35°C.

$$k = (6.67) 10^{-0.015(35-T)} \quad (5.4)$$

$$K_S = (2224) 10^{0.046(35-T)} \quad (5.5)$$

Una vez calculado el tiempo de retención celular mínimo, que considera condiciones ideales como rmezclado completo, tasas de alimentación y extracción de lodo digerido constantes, etc., debe seleccionarse un tiempo de retención celular de diseño adecuando que normalmente se encuentra entre 2 y 10 veces el θ_c^M para digestores de alta tasa. El factor de seguridad seleccionado depende de las cargas pico esperadas, la acumulación proyectada para arena, sólidos gruesos y espuma, flexibilidad necesaria, entre otros; se recomiendan factores de seguridad mayores para digestores más pequeños (WPCF, 1985).

La concentración en el efluente puede estimarse mediante la ecuación siguiente:

$$S_e = \frac{1 + k_d \theta_c^d}{\theta_c^d (Y k - k_d) - 1} (K_s) \quad (5.6)$$

donde:

S_e concentración sustrato en el efluente, kg/m^3

La biomasa producida en el digestor y el volumen de digestión se calcula con base en el tiempo de retención celular de diseño de acuerdo con las ecuaciones 5.7 y 5.8.

$$X = \frac{(Y)(Q)(S_0)(E)}{1 + (K_d)(\theta_c^M)} \quad (5.7)$$

donde:

X biomasa neta producida en el digestor, kg/d

Q caudal de lodo, m^3/d

θ_c^d tiempo de retención celular, d

E eficiencia de utilización del residuo (0.6-0.9), normalmente 0.8 (WPCF, 1985)

$$V = Q \theta_c^d \quad (5.8)$$

donde:

V volumen del digestor, m³

Para calcular el área y diámetro de digestores circulares es necesario considerar que la profundidad lateral del tanque debe mantenerse normalmente entre 6 y 12 m (EPA, 1979).

5.1.3.2 Producción de gas

La producción de gas es el resultado directo de la degradación de material orgánico por vía anaerobia. Normalmente se expresa como producción específica de gas en términos de volumen de gas por unidad de sólidos volátiles degradados. La tabla 5.7 presenta valores de la producción específica de gas para algunos constituyentes de lodos residuales; muestra que las grasas, aceites y otros compuestos orgánicos grasos tienen un alto contenido energético por lo que su producción específica de gas es mayor.

La producción específica de gas para lodos de aguas residuales de origen doméstico digeridos por vía anaerobia generalmente varía entre 0.75 y 1.1 m³/kg de sólidos volátiles eliminados.

TABLA 5.6 PRODUCCION ESPECIFICA DE GAS DURANTE UN PROCESO DE DIGESTION ANAEROBIA PARA ALGUNOS COMPUESTOS PRESENTES EN LODOS DE AGUAS RESIDUALES (EPA, 1979).

Material	Producción específica de gas, m ³ /kg	Contenido de metano, %
Compuestos grasos	1.12 - 1.43	62 - 72
Espuma	0.87 - 1.0	70 - 75
Grasas	1.06	68
Fibras crudas	0.81	45 - 50
Proteínas	0.75	73

La cantidad de metano liberada durante el tratamiento anaerobio puede estimarse a partir de su equivalente de oxígeno (Benefield y Randall, 1980). De acuerdo con la ecuación 5.9 un mol de metano (CH₄) equivale a 64 g de oxígeno (demanda química de oxígeno, DQO).



El volumen de metano por unidad de masa de DQO (producción específica de metano) puede calcularse considerando que a presión y temperatura estándar (1 atm y 0°C) un mol de cualquier gas ocupa un volumen de 22.4 l. De esta manera 1/64 mol de CH₄ ocupan 22.4 l/64 = 0.35 l, es decir se producen 0.35 l de CH₄ por gramo de DQO eliminada. El volumen de gas a otras temperaturas puede calcularse aplicando la Ley de Charles mediante la ecuación 5.10.

$$V_2 = (T_2/T_1)V_1 \quad (5.10)$$

donde:

- V₂ volumen del gas a la temperatura de digestión, l
- V₁ volumen del gas en condiciones estándar, 22.4 l
- T₂ temperatura de digestión, °K
- T₁ temperatura estándar, 273°K

La producción total de metano puede estimarse mediante la relación entre su producción específica y la cantidad de material orgánica eliminada (DQO eliminada) de acuerdo con la ecuación 5.11.

$$G = G_0 [\Delta S - 1.42 X] \quad (5.11)$$

donde:

- G producción total de metano, m³/d
- G₀ producción específica de metano, m³/kg de DQO eliminada
- ΔS DQO eliminada, kg/d
- X biomasa producida, kg/d

En un sistema estacionario la biomasa producida es igual a la biomasa purgada por día. El factor 1.42 representa el equivalente de oxígeno por unidad de biomasa

oxidada, que al multiplicarse por la biomasa generada en el digestor proporciona la fracción de DBO_U que no contribuye a la producción de metano.

La producción de metano representa aproximadamente dos terceras partes de producción total de gas que puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$G_T = G/0.67 \quad (5.12)$$

donde:

G_T producción total de gas, m^3/d

La tabla 5.7 presenta datos obtenidos en varias plantas acerca de la composición y características generales del gas obtenido durante un proceso de digestión anaerobia. La presencia de otros compuestos además de metano (no combustibles) reduce el valor calorífico esperado en el gas hasta aproximadamente 24 MJ/m^3 , comparado con 38 MJ/m^3 para el metano puro (WPCF, 1985).

TABLA 5.7 CARACTERISTICAS DEL GAS OBTENIDO MEDIANTE DIGESTION ANAEROBIA (WPCF, 1985).

Constituyente	Valores en diferentes plantas, % en volumen							
Metano, CH_4	42.5	61.0	62.0	7.0	70.0	73.7	75.0	73 - 75
Dióxido de carbono, CO_2	47.7	32.8	38.0	30.0	30.0	17.7	22.0	21 - 24
Hidrógeno, H_2	1.7	3.3	t	-	-	2.1	0.2	1.0 - 2.0
Nitrógeno, N_2	8.1	2.9	t	3.0	-	6.5	2.7	1.0 - 2.0
Sulfuro de hidrógeno, H_2S	-	-	0.15	-	t	0.06	0.1	1.0 - 1.15
Valor calorífico, kJ/m^3	17.0	24.8	24.6	23.4	27.1	29.5	26.7	27.5 - 27.9
Densidad relativa (aire = 1)	1.04	0.87	0.9	0.86	0.85	0.74	0.78	0.70 - 0.80

t = trazas

5.1.3.3 Calor requerido

El calor total requerido por un digestor anaerobio comprende el calor necesario para precalentar la corriente de alimentación de lodo hasta la temperatura de operación y el calor necesario para compensar las pérdidas por conducción a través de las

paredes del reactor. El calor necesario para calentar la alimentación de lodo se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$Q_1 = W C_p (T_2 - T_1) \quad (5.13)$$

donde:

- Q_1 calor requerido, kJ/d
- W flujo másico de lodo, kg/d
- C_p capacidad calorífica del agua, 4.2 kJ/kg•°C
- T_1 temperatura del lodo, °C
- T_2 temperatura de digestión, °C

La figura 5.3 muestra que pequeñas variaciones en la concentración de sólidos del lodo crudo afecta de manera importante el calor requerido para mantener la temperatura en el reactor.

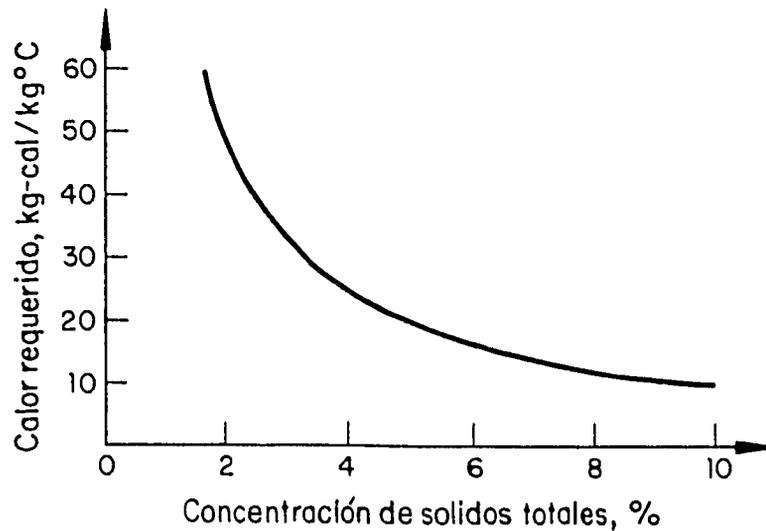


Fig. 5.3 Efecto de la concentración de sólidos en el lodo crudo sobre el calor requerido (EPA, 1979).

Las pérdidas de calor por conducción a través de las paredes del tanque se calculan mediante la ecuación 5.14.

$$Q_2 = U A 3.6(T_2 - T_3) \quad (5.14)$$

donde:

- Q_2 pérdidas de calor por conducción, kJ/h
- U coeficiente de transmisión de calor, $J/m^2 \cdot ^\circ C \cdot s$
- A área de exposición, m^2
- T_2 temperatura de digestión, $^\circ C$
- T_3 temperatura en las paredes externas del tanque, $^\circ C$
- 3.6 factor de conversión, $3.6 \text{ kJ/h} = \text{J/s}$

El coeficiente de transmisión de calor es función de la conductividad térmica material del, de los coeficientes de película en la superficie interna y externa del tanque y del espesor de las paredes. La tabla 5.8 presenta valores de este coeficiente para algunos tipos de cubierta, materiales de las paredes y condiciones del fondo de los digestores.

TABLA 5.8 COEFICIENTES DE TRANSMISION DE CALOR PARA DIGESTORES ANAEROBIOS DE DIFERENTES MATERIALES (EPA, 1979).

Material	Coeficiente de transmisión de calor, U ($J/m^2 \cdot ^\circ C \cdot s$)
Cubiertas fijas de acero, 6 mm de espesor	5.2
Cubiertas fijas de concreto, 280 mm de espesor	3.3
Cubierta flotante tipo Downes con techo de madera	1.9
Pared de concreto, 370 mm de espesor expuesta al aire	4.9
Pared de concreto, 370 mm de espesor, 25 mm de espacio y 100 mm de ladrillo refractario	1.5
Pared o piso de concreto 370 mm de espesor, expuesto a 3 m de espesor de tierra húmeda	0.62
Pared o piso de concreto 370 mm de espesor, expuesto a 3 m de espesor de tierra seca	0.34

Las pérdidas de calor pueden reducirse utilizando cubiertas y paredes aisladas. Normalmente se utilizan materiales como la fibra de vidrio o un espacio de aire y ladrillo refractario.

Para estimar si la producción de gas proporciona energía suficiente para mantener estable la temperatura de operación es conveniente comparar la energía total

requerida con el valor calorífico esperado en el gas, considerando una eficiencia de combustión de 60% (WPCF, 1985).

5.1.3.4 Mezclado

La mayoría de los fabricantes de equipo de mezclado para digestores sugieren el tipo, tamaño y el nivel de potencia adecuados de acuerdo con el volumen y forma del digestor. Se basan fundamentalmente en estudios piloto y experiencias anteriores de instalaciones similares.

Los mezcladores más utilizados en la digestión de lodos de aguas residuales funcionan mediante la recirculación y liberación de gas, que se prefieren a los equipos mecánicos internos porque proporcionan un mejor mezclado y porque requieren menos mantenimiento por corrosión o atascamiento.

Las dimensiones de este tipo de mezcladores se establece normalmente considerando tres parámetros: potencia unitaria, gradiente de velocidad y flujo unitario de gas.

La potencia unitaria se define como la energía que proporciona el motor por unidad de volumen del digestor sin considerar la forma del tanque, la viscosidad del lodo o la energía real aplicada. El intervalo de valores sugerido para la potencia unitaria fluctúa entre 5.2 y 40 W/m³ de digestor (WPCF, 1985). La EPA (1979) considera que si la potencia unitaria se mantiene entre 5 y 8 W/m³ el mezclado en el sistema será suficiente, mientras que Speece (1972), con base en pruebas de laboratorio, propone una potencia unitaria de 40 W/m³ de digestor para lograr el efecto de un reactor completamente mezclado.

El gradiente de velocidad indica la intensidad de mezclado; está determinado por la potencia disipada y por la viscosidad del lodo de acuerdo con la ecuación 5.15. La viscosidad del lodo disminuye con la temperatura y aumenta con la concentración de sólidos totales o si la concentración de sólidos volátiles aumenta más de 3% (WPCF, 1985).

$$G = (W/\mu)^{1/2} \quad (5.15)$$

donde:

- G raíz cuadrada media del gradiente de velocidad, s^{-1}
- W potencia disipada por unidad de volumen, Pa/s
- μ viscosidad absoluta, Pa s
(≈ 720 Pa s a $35^\circ C$ para lodos residuales de origen doméstico)

y:

$$W = E/V \quad (5.16)$$

donde:

- E potencia, W
- V volumen del tanque, m^3

Cuando el gas se descarga al digester se lleva a cabo un transferencia de energía hacia la fase líquida, ocasionada por la expansión isotérmica del gas y su elevación hasta alcanzar la superficie del líquido. Despreciando la energía cinética del gas, la potencia transferida puede ser estimarse mediante la siguiente ecuación:

$$E = 2.40 P_1 (Q) \ln (P_2/P_1) \quad (5.17)$$

donde:

- Q flujo de gas, m^3/s
- P_1 presión absoluta en la superficie de líquido, Pa
- P_2 presión absoluta en el punto de inyección de gas, Pa

Las ecuaciones 5.15 a 5.17 se utilizan para estimar la potencia necesaria y el flujo de gas en los compresores y motores del sistema. Los valores de G adecuados varían entre 50 y $80 s^{-1}$, donde los valores más bajos se recomiendan para sistemas con varios puntos de inyección, y los más altos para sistemas con una sola entrada de gas o cuando se espere una alta acumulación de grasas, aceites y/o espuma (EPA, 1979).

El flujo unitario de gas se define como el flujo de gas por unidad de volumen del digester. Puede calcularse reordenando las ecuaciones 5.15 y 5.17 de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$G = (W/\mu)^{1/2} \quad (5.15)$$

donde:

- G raíz cuadrada media del gradiente de velocidad, s^{-1}
- W potencia disipada por unidad de volumen, Pa/s
- μ viscosidad absoluta, Pa s
(≈ 720 Pa s a $35^\circ C$ para lodos residuales de origen doméstico)

y:

$$W = E/V \quad (5.16)$$

donde:

- E potencia, W
- V volumen del tanque, m^3

Cuando el gas se descarga al digester se lleva a cabo una transferencia de energía hacia la fase líquida, ocasionada por la expansión isotérmica del gas y su elevación hasta alcanzar la superficie del líquido. Despreciando la energía cinética del gas, la potencia transferida puede ser estimarse mediante la siguiente ecuación:

$$E = 2.40 P_1 (Q) \ln (P_2/P_1) \quad (5.17)$$

donde:

- Q flujo de gas, m^3/s
- P_1 presión absoluta en la superficie de líquido, Pa
- P_2 presión absoluta en el punto de inyección de gas, Pa

Las ecuaciones 5.15 a 5.17 se utilizan para estimar la potencia necesaria y el flujo de gas en los compresores y motores del sistema. Los valores de G adecuados varían entre 50 y $80 s^{-1}$, donde los valores más bajos se recomiendan para sistemas con varios puntos de inyección, y los más altos para sistemas con una sola entrada de gas o cuando se espere una alta acumulación de grasas, aceites y/o espuma (EPA, 1979).

El flujo unitario de gas se define como el flujo de gas por unidad de volumen del digester. Puede calcularse reordenando las ecuaciones 5.15 y 5.17 de acuerdo a la ecuación siguiente:

$$Q/V = (G^2 \mu) / [P_1 \ln(P_2/P_1)] \quad (5.18)$$

Normalmente se sugieren valores de Q/V entre 76 y 83 mL/m³ s para sistemas de elevación libre del gas y entre 80 y 120 mL/m³ s para sistemas de liberación del gas a través de un tubo (ver sección 5.1.5.4).

5.1.3.5 Reducción de material orgánico

Uno de los principales objetivos de la digestión anaerobia consiste en la reducción de material orgánico (sólidos volátiles). Normalmente, en un digestor de alta tasa el porcentaje de reducción de sólidos volátiles varía entre 35 y 60% dependiendo de las características del lodo y de la operación del sistema (EPA, 1979).

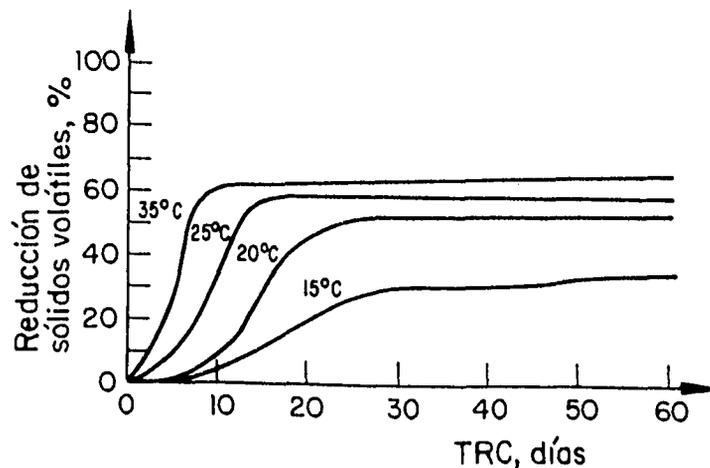


Fig. 5.4 Reducción de sólidos volátiles en función de la temperatura en el intervalo mesofílico (EPA, 1979).

Las características del lodo determinan el nivel máximo en la reducción de sólidos que se puede conseguir. Comúnmente, sólo entre el 60 y 80% del material

orgánico presente en lodos de aguas residuales domésticas puede ser degradado por las bacterias anaerobias, ya que el resto está constituido por moléculas orgánicas complejas como ligninas (EPA, 1979).

El tiempo de retención celular y la temperatura son los parámetros de operación que afectan más significativamente la reducción de material orgánico. La figura 5.4 muestra los resultados obtenidos en un estudio a nivel laboratorio de un proceso de digestión anaerobia mesofílica. En general, la reducción de material orgánico aumenta rápidamente con el tiempo de retención celular hasta alcanzar un valor máximo, que aumenta con la temperatura en el intervalo mesofílico, y después permanece prácticamente constante.

La reducción de sólidos volátiles puede estimarse por medio las ecuaciones empíricas 5.19 y 5.20 para digestores convencionales y de alta tasa respectivamente, o mediante la tabla 5.9 (WPCF, 1985).

$$V_d = 30 + \theta_c^d / 2 \quad (5.19)$$

donde:

V_d reducción de sólidos volátiles, %

t tiempo de digestión, d

$$V_d = 13.7 \ln (\theta_c^d) + 18.94 \quad (5.20)$$

TABLA 5.9 REDUCCION DE SOLIDOS VOLATILES (WPCF, 1985)

	Tiempo de digestión, días	Reducción de sólidos volátiles, %
Digestión de alta tasa	30	65.5
	20	60.0
	15	56.0
Digestión convencional	40	50.0
	30	45.0
	20	40.0

Una vez estimado el porcentaje de reducción de material orgánico en el primer digestor en un proceso de dos etapas, es posible estimar la cantidad de sólidos que

entra al segundo reactor mediante la ecuación 5.21, suponiendo que la cantidad de sólidos fijos permanece constante.

$$\text{Sólidos} = ST - (SV)(ST)(V_d) \quad (5.21)$$

donde:

ST sólidos totales que entran al primer digestor, kg/d

SV sólidos volátiles, %

V_d reducción de sólidos volátiles en el primer digestor, %

5.1.3.6 Otras consideraciones

Calidad del sobrenadante

Para determinar si es conveniente recircular el sobrenadante o efluente del digestor a la sección de tratamiento secundario, es importante considerar que generalmente contiene altas concentraciones de sólidos suspendidos, DQO, DBO, fósforo, nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico; por lo tanto, la carga orgánica al sistema de tratamiento biológico aumenta drásticamente, generando un efluente de baja calidad. Este problema se reduce si el lodo se espesa antes de alimentarse al digestor. La tabla 5.10 presenta valores de algunos parámetros en el efluente de digestores anaerobios mesofílicos en diferentes plantas.

Acumulación de arena, espuma o natas

Es importante diseñar las instalaciones de manera que se elimine o disminuya la acumulación de arena, espuma y natas en el tanque, ya que reduce el volumen efectivo de digestión, la eficiencia de mezclado y calentamiento, y dificulta la formación y recolección de gas.

Este problema puede prevenirse o retardarse si el tren de tratamiento cuenta con cámaras desarenadoras y con un eficiente sistema de remoción de natas en los

sedimentadores y espesador. Es conveniente también que el digestor cuente con un buen sistema de mezclado para mantener la arena en suspensión y las natas dispersas en el tanque; sin embargo, hay que considerar que un mezclado excesivo favorece la formación de espuma.

TABLA 5.10 CARACTERISTICAS DEL EFLUENTE DE UN PROCESO DE DIGESTION ANAEROBIA MESOFILICA EN DOS ETAPAS EN ALGUNAS PLANTAS PARA DIFERENTES TIPOS DE LODO (WPCF, 1985).

Parámetro	Concentración, mg/l									
	PRI		PRI + FP			PRI + LA				
Sólidos totales	9,400	-	4,545	-	-	1,475	2,160	-	-	-
Sólidos volátiles tot.	4,900	-	2,930	-	-	814	983	-	-	-
Sólidos suspendidos										
promedio	-	4,277	2,205	1,518	7,772	383	143	740	1,075	4,408
máximo	-	17,300	-	-	32,400	-	-	-	-	14,650
mínimo	-	660	-	-	100	-	-	-	-	100
SSV										
promedio	-	2,645	1,660	-	4,403	299	118	-	750	3,176
máximo	-	10,850	-	-	17,750	-	-	-	-	10,650
mínimo	-	420	-	-	60	-	-	-	-	75
DBO										
promedio	-	713	-	-	1,238	-	-	-	515	667
máximo	-	1,880	-	-	6,000	-	-	-	-	2,700
mínimo	-	200	-	-	135	-	-	-	-	100
DQO	-	-	4,565	2,230	-	1,384	1,310	1,230	-	-
COT	-	-	1,242	-	-	443	320	-	-	-
Fosfatos totales	-	-	143	85	-	63	87	100	-	-
Nitrógeno amoniacal	-	-	853	-	-	253	559	-	480	-
Nitrógeno orgánico	-	-	291	678	-	53	91	360	560	-
pH	8.0	-	7.3	7.2	-	7.0	7.8	7.0	7.3	-
Acidos volátiles	-	-	264	-	-	322	250	-	-	-
Alcalinidad	2,555	-	3,780	-	-	1,349	1,434	-	-	-
Fenoles										
promedio	-	0.23	-	-	0.23	-	-	-	-	0.35
máximo	-	0.80	-	-	0.50	-	-	-	-	1.00
mínimo	-	0.06	-	-	0.06	-	-	-	-	0.08

Control de alcalinidad y pH

Como se indicó en la sección 5.1.1, las bacterias productoras de metano se caracterizan su alta sensibilidad a variaciones en el pH, por lo que la estabilidad del

proceso depende en gran medida de la capacidad amortiguadora del sistema, es decir, de su resistencia a cambios de pH.

La medida cualitativa más común de la capacidad amortiguadora en aguas residuales es el contenido de alcalinidad: a mayor alcalinidad, más resistencia a cambios de pH. En digestores anaerobios el contenido de alcalinidad como carbonatos (CaCO_3) varía normalmente entre 1500 y 5000 mg/l, y si la relación entre ácidos volátiles y alcalinidad permanece por debajo de 0.25, la capacidad amortiguadora del sistema se mantiene en un nivel adecuado (WPCF, 1985).

En un proceso anaerobio el equilibrio químico ácido-base más importante está determinado por la relación entre las concentraciones de dióxido de carbono y bicarbonatos, es decir, el pH del sistema está controlado por la concentración de CO_2 en la fase gaseosa y por la concentración de bicarbonatos en la fase líquida. Gracias a este equilibrio es factible controlar el pH mediante la aplicación de sustancias alcalinas, siempre y cuando la concentración de los cationes asociados no causen toxicidad. Si la concentración de CO_2 permanece constante y aumenta la concentración de bicarbonatos, necesariamente aumenta el pH para mantener el equilibrio. La alcalinidad de bicarbonatos puede calcularse a partir de la alcalinidad total que comprende también la alcalinidad originada por ácidos volátiles, como la formación de acetato, mediante la ecuación siguiente:

$$AB = AT - (0.71 AV) \quad (5.22)$$

donde:

AB alcalinidad por bicarbonatos, mg/l de CaCO_3

AT alcalinidad total, mg/l de CaCO_3

AV ácidos volátiles, mg/l de ácido acético

0.71 factor de conversión

La alcalinidad de bicarbonatos, medida en mg/l de CaCO_3 , necesaria para elevar el valor de la alcalinidad total puede estimarse mediante la ecuación 5.23. Normalmente se aplica carbonato de calcio o su equivalente en bicarbonatos, cal, carbonato de sodio o hidróxido de amonio.

$$D_d = D_{\max} (1 - 1/\theta) \quad (5.23)$$

donde:

D_d	alcalinidad necesaria por día, mg/l de CaCO_3
D_{\max}	incremento necesario, mg/l de CaCO_3
\emptyset	tiempo de retención celular, d

Presencia de sustancias tóxicas

Antes de considerar la toxicidad de cualquier sustancia es importante establecer las siguientes condiciones para cualquier proceso de digestión anaerobia:

- Es necesario que cualquier material que se considere tóxico biológicamente, se mantenga en solución para que pueda penetrar a través de las paredes celulares de los microorganismos;
- la toxicidad es un término relativo, es decir, el mismo compuesto puede presentar efectos estimulantes o inhibitorios sobre las bacterias metanogénicas, dependiendo de su concentración;
- cuando la concentración de una sustancia potencialmente tóxica se incrementa muy lentamente, algunos microorganismos pueden adaptarse a ella;
- es posible que la presencia de otras sustancias disminuyan o aumenten el efecto tóxico (efectos antagónicos y sinérgicos, respectivamente).

Algunas sustancias potencialmente tóxicas para las bacterias productoras de metano son las siguientes: ácidos volátiles, metales pesados, cationes de metales alcalinos y alcalinotérreos, oxígeno, sulfuros y amonio. Como se muestra en la tabla 5.11, la presencia de metales alcalinos y/o alcalinotérreos origina efectos estimulatorios o inhibitorios dependiendo de su concentración.

El efecto tóxico de sulfuros solubles es considerable a concentraciones mayores de 200 mg/l. La concentración de sulfuros en el digester es función de la concentración de sulfuros en el agua residual, el pH, la tasa de producción de gas y de la concentración de metales pesados; puede reducirse por medio de la precipitación de los sulfatos de metales pesados o mediante la aplicación de sales de hierro.

La presencia de metales pesados en el lodo, inhibe el proceso de digestión a determinadas concentraciones y limita las opciones para su disposición final. La cantidad de metales pesados depende de los procesos de tratamiento previos y de su concentración en el agua residual cruda: a mayor concentración en el agua residual, mayor es el porcentaje de remoción y, por lo tanto, mayor su concentración en el lodo. La tabla 5.12 presenta valores de concentraciones a las que algunos metales pesados causan inhibición severa en digestión anaerobia.

TABLA 5.11 EFECTO DE LA CONCENTRACION DE IONES METALICOS SOBRE MICROORGANISMOS METANOGENICOS (WPCF, 1985).

Cación	Concentración, en mg/l		
	estimuladorio	moderadamente inhibitorio	fuertemente inhibitorio
Calcio	100 - 200	2,500 - 4,500	8,000
Magnesio	75 - 150	1,000 - 1,500	3,000
Potasio	200 - 400	2,500 - 4,500	12,000
Sodio	100 - 200	3,500 - 5,500	8,000

Los efectos tóxicos del amoniaco pueden ser causados por las dos formas químicas presentes en el equilibrio: amoniaco gaseoso, NH_3 (g), y ión amonio en solución, NH_4^+ . Su presencia causa fuerte inhibición del proceso a una concentración de nitrógeno amoniacal total ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) de 1,200 mg/l o mayor si se opera con un valor de pH superior a 7.4.

TABLA 5.12 CONCENTRACION NECESARIA DE IONES DE METALES PESADOS PARA INHIBIR FUERTEMENTE EL PROCESO DE DIGESTION ANAEROBIA.

Metal	Concentración		
	por ciento de sólidos secos	mmol/kg de sólidos secos	metales solubles mg/l
Cobre	0.93	150	0.5
Cadmio	1.98	100	-
Zinc	0.97	150	1.0
Fierro	9.56	1,710	-
Cromo ⁺⁶	2.20	420	3.0
Cromo ⁺³	2.60	500	-
Niquel	-	-	2.0

5.1.4 Procedimiento de diseño

Para diseñar un proceso de digestión anaerobia es necesario tener información acerca de la calidad y cantidad del lodo que será estabilizado, con datos como: caudal promedio, caudal máximo, concentración aproximada de sólidos, porcentaje de sólidos volátiles, relación entre lodos primarios y secundarios cuando se trate de mezclas, etc. Es importante también considerar la temperatura de operación, tiempo de almacenaje, material de construcción de los digestores, etc.

La cantidad teórica de sólidos totales primarios y/o secundarios que se alimentan al digestor pueden calcularse mediante un balance de materia en la sección de tratamiento correspondiente o extrapolando datos de instalaciones similares. El porcentaje de sólidos volátiles puede estimarse mediante pruebas de laboratorio. El volumen de lodo alimentado al reactor se calcula mediante la ecuación 5.24.

$$V_L = W_L / (W_a \delta_r f) \quad (5.24)$$

donde:

- V_L alimentación diaria de lodo, l/d
- W_L masa de lodo generado en base seca, kg/d
- W_a masa de agua, kg
- δ_r densidad relativa del lodo
- f fracción porcentual de sólidos en el lodo

La densidad relativa del lodo puede estimarse con base en las fracciones másicas de los sólidos fijos y volátiles de acuerdo con la ecuación 5.25, o bien mediante la concentración de sólidos totales de acuerdo con la ecuación 5.26.

$$1 / \delta_r = (W_w / \delta_{rw}) + (W_f / \delta_{rf}) + (W_v / \delta_{rv}) \quad (5.25)$$

donde:

- δ_r densidad relativa del lodo
- δ_{rw} densidad relativa del agua (1.0)
- δ_{rf} densidad relativa de los sólidos fijos (= 2.5)

δ_{rv} densidad relativa de los sólidos volátiles (= 1.3)

W_w fracción másica del agua

W_f fracción másica de los sólidos fijos

W_v fracción másica de los sólidos volátiles

$$\delta_r = 1.0 + 0.005 ST \quad (5.26)$$

donde:

ST concentración de sólidos totales, %

A continuación se describe paso a paso el procedimiento común para el diseño de un proceso en dos etapas de una mezcla de lodos primarios y secundarios.

- 1/ Estimar el caudal máximo de lodos primarios y secundarios.
- 2/ Estimar el porcentaje de sólidos volátiles en la mezcla.
- 3/ Corregir los coeficientes k y K_s por efecto de la temperatura mediante las ecuaciones 5.4 y 5.5.
- 4/ Calcular el tiempo mínimo de retención celular mediante la ecuación 5.3.
- 5/ Estimar la concentración de material orgánico (DBO o DQO) en los lodos primarios y secundarios.
- 6/ Estimar la concentración de DBO en la mezcla.
- 7/ Utilizando un factor de seguridad (aproximadamente entre 3 y 6 bajo condiciones normales), calcular el tiempo de retención celular de diseño.
- 8/ Calcular el volumen de digestión (primer digestor) mediante la ecuación 5.8.
- 9/ Calcular el área y el diámetro del digestor, considerando una profundidad lateral entre 6 y 12 m dependiendo del volumen.
- 10/ Calcular la concentración de material orgánico en el efluente mediante la ecuación 5.6.
- 11/ Calcular la biomasa en el digestor mediante la ecuación 5.7.
- 12/ Calcular el volumen de gas generado de acuerdo con la ecuación 5.10.
- 13/ Calcular la producción de metano mediante la ecuación 5.11.
- 14/ Estimar el calor disponible.
- 15/ Determinar las pérdidas de calor por conducción mediante la ecuación 5.14.
- 16/ Determinar el calor necesario para mantener la temperatura de digestión mediante la ecuación 5.13.
- 17/ Estimar el calor total que requiere el proceso (suma de los incisos 15 y 16).

- 18/ Determinar el volumen de lodo en la segunda etapa:
- 19/ Calcular la reducción de sólidos volátiles mediante la ecuación 5.20.
- 20/ Calcular el porcentaje de sólidos después de la digestión mediante la ecuación 5.21.
- 21/ Estimar el volumen de lodo digerido (ecuación 5.24).
- 22/ Calcular el volumen del segundo digestor considerando un tiempo de almacenaje suficiente, dependiendo los procesos de tratamiento subsecuentes y de la disposición final.
- 23/ Calcular el área y diámetro del espesador.

5.1.5 Descripción del equipo

5.1.5.1 Tanques

Los digestores normalmente son cilíndricos, pero también se han diseñado en forma rectangular y, más recientemente, en forma "de huevo". Los tanques rectangulares son poco recomendables a pesar de ser los de menor costo, porque es más difícil proporcionar un mezclado eficiente y, consecuentemente, mantener condiciones homogéneas en el reactor ya que se generan con facilidad espacios "muertos" en las esquinas.

Los digestores cilíndricos generalmente se construyen de concreto reforzado, aunque también se han construido de acero por su menor costo (WPCF, 1985). Sus diámetros varían generalmente entre 8 y 40 m, y su profundidad lateral entre 6 y 12 m, tratando de mantener la relación entre el radio del tanque y la profundidad de líquido entre 0.7 y 2.0 (EPA, 1979). Comúnmente el fondo del tanque es cónico, con una pendiente mínima de 1:6 para facilitar la extracción del lodo digerido, evitando acumulaciones indeseables de material voluminoso; el fondo puede estar equipado con una sola salida para el lodo, o puede estar dividido en varias secciones iguales con una salida para cada sección. En algunos casos es necesario aislar los tanques para evitar excesivas pérdidas de calor por conducción

a través de las paredes, cubierta y fondo del tanque. La figura 5.5 muestra el corte transversal de un digestor cilíndrico.

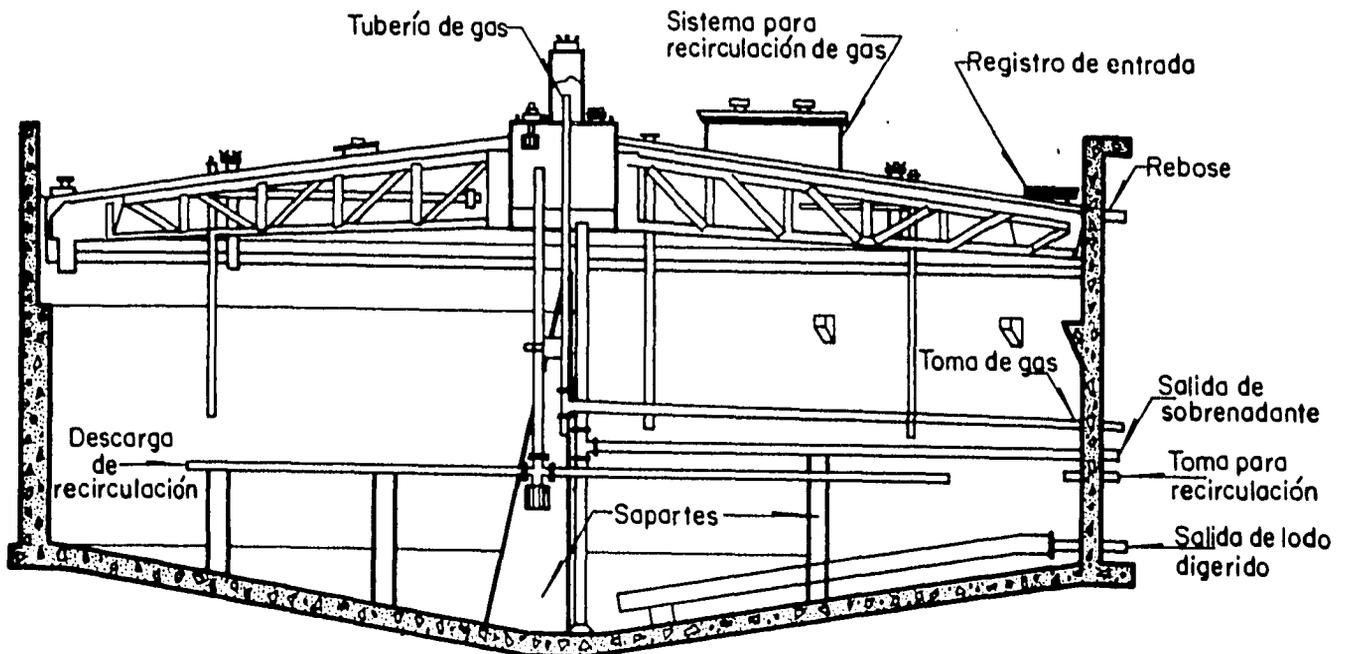


Fig. 5.5 Corte transversal de un digestor cilíndrico

Los tanques en forma de huevo cuentan con el fondo considerablemente inclinado, de manera que prácticamente se eliminan los problemas por acumulación de arena y las operaciones de limpieza. La parte superior tiene un diámetro pequeño para que la espuma pueda mantenerse suave fácilmente mediante un mezclador de superficie y eliminada fácilmente a través de compuertas especiales. La figura 5.6 muestra el corte de un digestor en forma de huevo.

Los digestores en forma de huevo han sido ampliamente empleados en Europa, principalmente desde la década de los sesenta; sin embargo, su diseño sofisticado y las técnicas especiales necesarias para su construcción los hace excesivamente costosos.

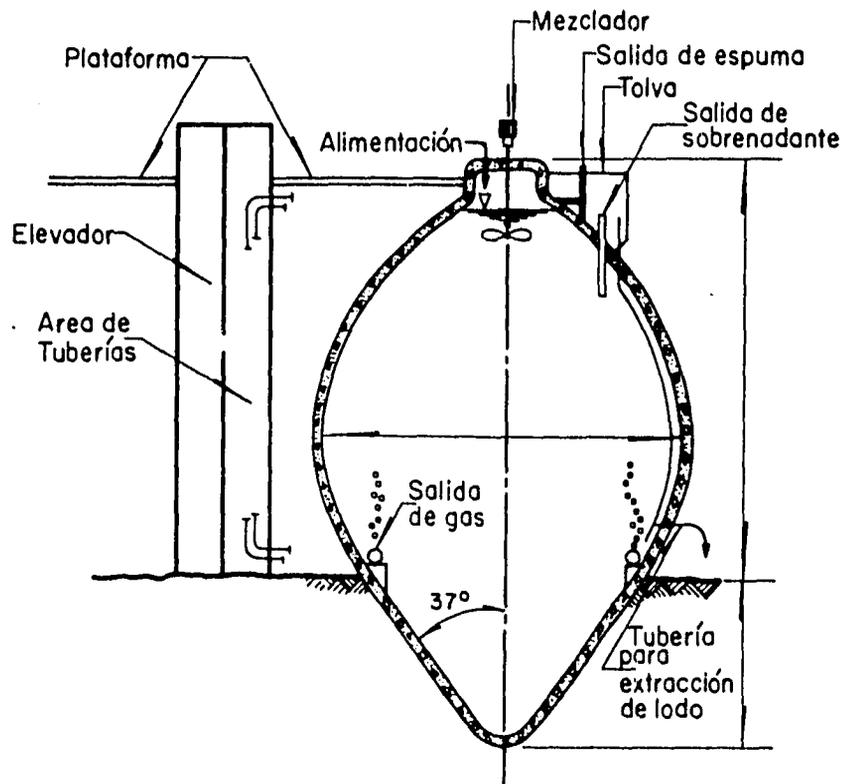


Fig. 5.6 Corte transversal de un digestor en "forma de huevo"

5.1.5.2 Cubiertas

Las ventajas de utilizar digestores cubiertos se centran principalmente en la recolección del gas, además de favorecer la reducción de olores indeseables y la estabilidad de la temperatura de digestión. En algunas ocasiones, las cubiertas sirven para sostener el equipo de mezclado y proporcionar acceso al interior del tanque. Las cubiertas pueden ser fijas o flotantes. La figura 5.7 presenta los diferentes tipos de cubiertas para digestores.

Las cubiertas fijas pueden ser planas o en forma de domo, fabricadas de concreto reforzado, acero, fibra de vidrio o algunos polímeros de alta resistencia. Este tipo de cubiertas son menos costosas que las cubiertas flotantes y están diseñadas para mantener un nivel de superficie constante en el tanque; sin embargo, aumentan los riesgos de accidentes ocasionados por fracturas en la cubierta ocasionado por cambios de temperatura, o por la formación de mezclas explosivas gaseosas, si se llegan a combinar los gases de digestión con oxígeno; Qasim (1985) informa que basta una proporción entre 5 y 20% en volumen de aire con los gases generados durante la digestión para originar mezclas explosivas. La entrada de aire al digestor puede ser causada por una rápida extracción de lodo digerido, no compensada con la alimentación.

Las cubiertas flotantes son más costosas, pero proporcionan más flexibilidad en la alimentación y descarga del lodo, y con ellas es factible controlar más eficientemente la formación de espuma. Las hay que flotan directamente sobre el líquido y que flotan sobre el gas.

Las cubiertas que flotan sobre el gas tienen un margen de movimientos de aproximadamente 3 m para permitir almacenamiento del gas durante períodos en los que su producción exceda la demanda (WPCF, 1985). Son menos estables que las cubiertas tipo Downes y tipo Wiggins por estar sobre un colchón de gas y porque exponen una gran superficie lateral a fuertes cargas de viento.

Las cubiertas que flotan sobre el líquido pueden ser de dos tipos que difieren principalmente en el método utilizado para mantener la fuerza ascendente del gas, que a su vez determina el grado de sumergencia de la cubierta: cubiertas tipo Wiggins o de pontón y cubiertas tipo Downes. Las primeras se caracterizan por la curvatura pronunciada en su extremo externo y porque solo una pequeña parte queda sumergida en el líquido, proporcionando mayor espacio para el gas sobre la superficie del líquido; con esto se obtiene un gran desplazamiento de líquido para pequeños incrementos en el grado de sumergencia de la cubierta. Por el contrario, en las cubiertas tipo Downes la curvatura es poco pronunciada, de manera que normalmente una tercera parte de la cubierta se mantiene en contacto con el líquido, proporcionando pequeños desplazamientos de líquido por una mayor sumergencia; en este caso, es necesario incrementar el grado de sumergencia

mediante lastres fijas a la cubierta, de manera que el nivel de líquido se mantiene a algunos centímetros del domo central para el gas (EPA, 1979).

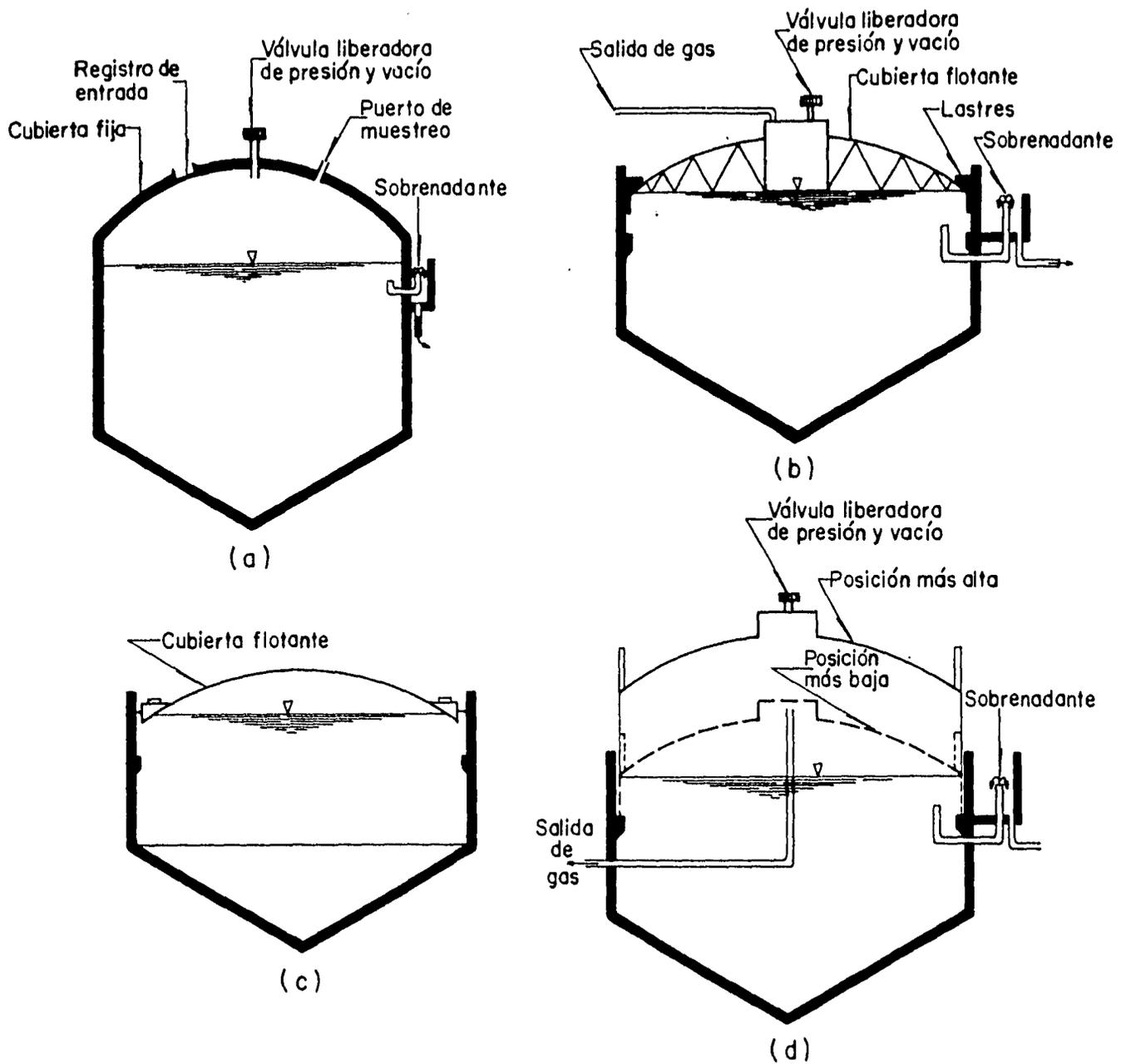


Fig. 5.7 Diferentes tipos de cubiertas para digestores
 a) cubierta fija; b) cubierta flotante tipo Wiggins; c) cubierta flotante tipo Downes;
 d) cubierta que flota sobre el gas

Los accesorios típicos para una cubierta incluyen puertos de muestreo, registros de acceso y para la ventilación y remoción de residuos durante la limpieza, un sistema para el sobreflujo de líquido y válvulas de desahogo para presión y vacío. Generalmente la presión del gas bajo la cubierta fluctúa entre 0 y 3.7 kN/m² (Qasim, 1985).

5.1.5.3 Equipo de mezclado

Los métodos empleados para el mezclado de digestores incluyen: el bombeo de la corriente de recirculación de lodo digerido, el mezclado mecánico y la recirculación de gas.

El primero es un método relativamente sencillo; sin embargo, es necesario bombear grandes volúmenes de lodo para proporcionar un mezclado suficiente en la digestión de alta tasa. Su eficiencia puede elevarse asegurando suficiente potencia en el equipo de bombeo, aproximadamente entre 5 y 8 W/m³ de reactor; en algunas ocasiones se utiliza con mayor ventaja en combinación con otro sistema de mezclado, como dispositivos mecánicos (EPA, 1979).

El mezclado mecánico por medio de propulsores, turbinas, impulsores, o dispositivos similares es practicado con mayor frecuencia en procesos industriales; sin embargo, su empleo en el tratamiento de lodos de aguas residuales ha sido limitado, debido a la naturaleza no homogénea del lodo y a que la gran cantidad de material fibroso provocan que las propelas o hélices se traben con facilidad y causen fallas en el equipo. Normalmente se instalan dentro de un eje cilíndrico para proporcionar un mezclado vertical (Qasim, 1985).

La recirculación de gas actualmente es el método más empleado ya que proporciona un mezclado efectivo con relativa sencillez. Existen varios diseños que incluyen los siguientes (EPA, 1979):

- Inyección de gas al lodo en el fondo de un eje cilíndrico central, para crear el efecto de un flujo pistón y proporcionar agitación periódica en la superficie.
- Inyección secuencial de gas a través de tubos de aspiración suspendidos de la cubierta de digester, cuya salida sea en el punto más profundo posible.
- Liberación de las burbujas de gas a través de un anillo de difusores montados en el fondo del tanque.
- Liberación de las burbujas de gas a través de un tubo colocado dentro del tanque.

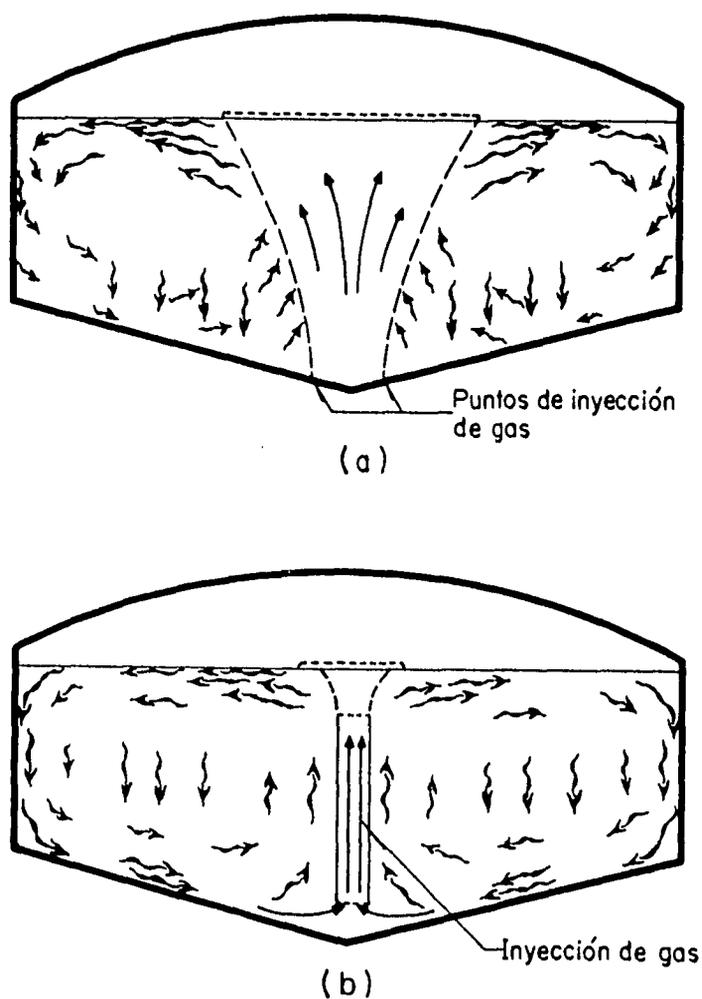


Fig. 5.8 Modelos de la circulación del lodo en diferentes sistemas de mezclado por recirculación de gas, (a) a través de difusores de fondo, (b) liberación del gas a través de un tubo.

El primer método generalmente presenta bajos consumos de energía y, por lo tanto, se consiguen bajos niveles de mezclado; su mayor ventaja consiste en el control de la formación de espuma. Por el contrario, los tubos de aspiración, los difusores de fondo y la liberación del gas a través de un tubo central son sistemas que proporcionan un alto nivel de mezclado. El modelo de circulación del lodo en los dos últimos métodos se presenta en la figura 5.8.

5.1.5.4 Equipo de calentamiento

Los métodos comunes para el calentamiento del lodo son los siguientes:

- Intercambiadores de calor internos;
- inyección de vapor directamente al lodo, e
- intercambiadores de calor externos.

Los primeros intercambiadores de calor diseñados para los digestores anaerobios fueron internos (comúnmente serpentines fijos a la pared del tanque por los que fluye agua caliente); sin embargo, la dificultad para darles mantenimiento si fallan o se obstruyen por acumulación de sales, causando con frecuencia disminuciones importantes en el transferencia de calor ha hecho que se prefieran los intercambiadores externos (Qasim, 1985). El sistema de inyección de vapor requiere poco equipo pero diluye el lodo de manera importante, por lo que es poco recomendable (EPA, 1979). Los intercambiadores de calor externos son los más empleados principalmente porque su mantenimiento es sencillo; normalmente operan con la corriente de recirculación de lodo digerido.

Existen tres tipos de intercambiadores de calor externos: baño de agua, tubos enchaquetados y en espiral. En el primer tipo, los tubos de calentamiento y de lodo se encuentran en un recipiente común lleno con agua. El intercambiador de tubo enchaquetado consiste en dos tubos concéntricos por los cuales fluyen a contracorriente el lodo en el interior y el fluido de calentamiento en el exterior. El intercambiador en espiral también opera a contracorriente pero, como su nombre lo

indica, la trayectoria del lodo y el agua es un espiral. La figura 5.9 muestra el diagrama de flujo par intercambiadores de calor de baño de agua y de diseño en espiral.

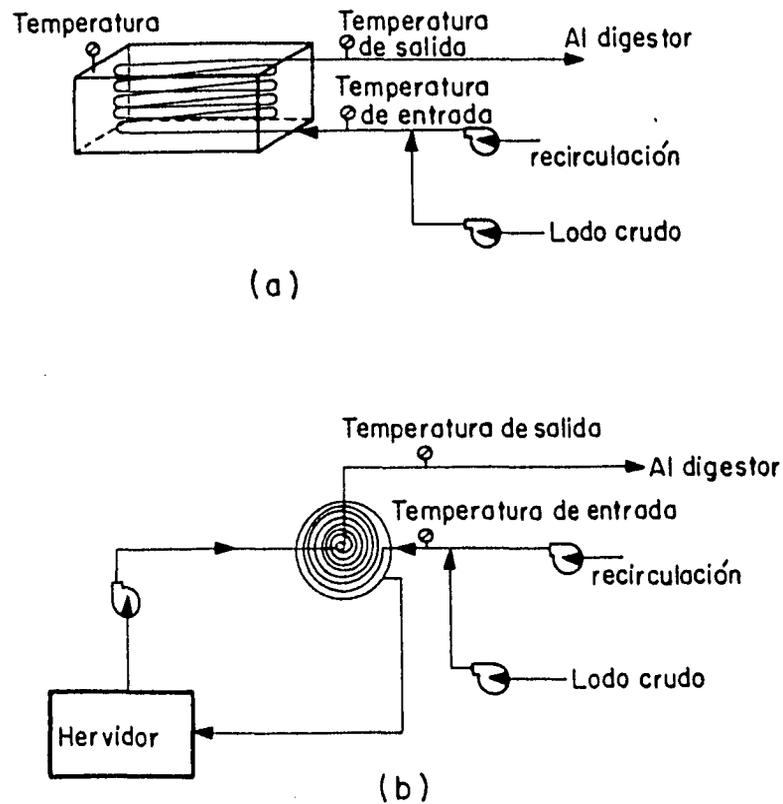


Fig. 5.9 Intercambiadores de calor externos empleados en digestores anaerobios
(a) tipo baño de agua, (b) tipo de espiral a contracorriente

Los coeficientes de transferencia de calor para intercambiadores de calor externos varían entre 0.9 y 1.6 $\text{kJ}/(\text{m}^2)(^\circ\text{C})(\text{s})$ dependiendo del tipo y material del intercambiador y de la turbulencia del fluido (WPCF, 1985).

5.1.6 Operación y mantenimiento

Uno de los aspectos más importantes para favorecer el correcto desempeño de un proceso de digestión anaerobia es el control de variaciones en sus condiciones de operación. Para ello, es importante que todas las corrientes del sistema estén disponibles para su muestreo y análisis, de manera que al determinar el valor de algunos parámetros químicos, físicos y fisicoquímicos sea posible controlar a tiempo posibles variaciones en las condiciones de operación del proceso. En la corriente de alimentación de lodo debe determinarse el contenido de sólidos totales, sólidos volátiles, pH, alcalinidad y temperatura. En la corriente de lodo digerido debe determinarse el valor de todos los parámetros anteriores y además la concentración de ácidos volátiles. Cuando el sobrenadante se recircula a la sección de tratamiento biológico es importante determinar el pH, DBO, DQO, concentración de sólidos totales, nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal y fosfatos. En la corriente gaseosa debe medirse la presión, volumen y determinarse la composición de la mezcla. En el fluido de calentamiento se recomienda controlar la temperatura, concentración de sólidos disueltos y pH. Además de los parámetros mencionados, es muy importante medir y controlar el caudal en todas las corrientes de proceso.

Tanto los tanques como el equipo de mezclado y calentamiento deben diseñarse de manera que su acceso sea fácil, durante las operaciones de limpieza y mantenimiento en general, y que proporcionen condiciones de máxima seguridad para el personal. Debe promoverse la utilización de equipo de seguridad por parte de los operarios al entrar a los digestores, ya sea para funciones de inspección, limpieza o mantenimiento. Generalmente, los tanques están provistos de registros en la cubierta y en el costado, de aproximadamente 0.9 m de diámetro para permitir que un operador maneje con facilidad equipo para remover acumulaciones de arena o espuma. Así mismo, se recomienda que el sistema de recolección y manejo de gas cuente con válvulas de desahogo para presión y vacío, con trampas de llamas, y con un mecanismo de apagado automático.

El ciclo de limpieza del digestor depende de la acumulación de espuma en la superficie del líquido, arena y lodo en el fondo del tanque (reducción del volumen efectivo de digestión), de las condiciones del equipo de mezclado y calentamiento, y de la capacidad para desviar o almacenar la corriente de alimentación de lodo.

5.2 Digestión aerobia

La digestión aerobia es la degradación de residuos biológicos mediante la acción de microorganismos que utilizan oxígeno molecular para llevarla a cabo. Genera un producto final estable, reduce el contenido de sólidos orgánicos y por consiguiente el volumen del lodo, con resultados comparables o mejores que los obtenidos por vía anaerobia. Su operación es sencilla y sus costos capitales son relativamente bajos. Se lleva a cabo en tanques abiertos o cerrados, permitiendo suficiente tiempo de contacto entre los organismos aerobios y la materia orgánica biodegradable.

5.2.1 Fundamentos del proceso

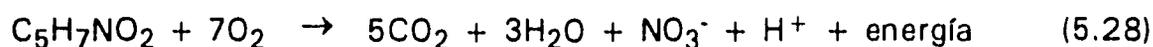
La digestión aerobia es un proceso que se lleva a cabo en dos etapas: la oxidación directa de sustratos exógenos (material orgánico contaminante), y la respiración endógena de los microorganismos aerobios. Durante esta última, se efectúa la estabilización real del residuo; ocurre cuando no hay suficientes sustratos exógenos y los organismos comienzan a consumir sus propias reservas internas para obtener energía suficiente para el mantenimiento de las reacciones necesarias para el metabolismo de las células. De esta manera, si se permite el suficiente tiempo de retención celular, la cantidad total de biomasa disminuye notablemente y la fracción remanente permanecerá en un estado de energía tan bajo que puede considerarse biológicamente estable y adecuada para su disposición final al medio ambiente. Generalmente, solo es posible degradar entre el 75 y 80% del material celular, ya que la fracción restante está constituida de compuestos inertes o compuestos orgánicos no biodegradables.

Cuando se digieren mezclas de lodos primarios y biológicos es importante considerar que los primeros, aunque de naturaleza primordialmente orgánica,

7

contienen poca biomasa activa y, por lo tanto, constituyen una fuente importante de sustrato exógeno para los microorganismos contenidos en los lodos biológicos. En este caso, para lograr un nivel importante en la degradación del material celular es necesario proporcionar mayores tiempos de retención que los requeridos para obtener un nivel de estabilización semejante cuando se digieren lodos biológicos exclusivamente (Benefield y Randall, 1980).

Durante la digestión el material celular es oxidado por los microorganismos aerobios a dióxido de carbono, agua y amoníaco o nitratos. Las ecuaciones 5.27 y 5.28 presentan la estequiometría del proceso de digestión aerobia, utilizando la fórmula típica $C_5H_7NO_2$ como representación del material celular de los microorganismos. Estas reacciones de oxidación son exotérmicas, por lo que durante el proceso se libera energía en forma de calor.



La ecuación 5.27 representa un sistema en el que se inhibe la nitrificación, es decir, el nitrógeno aparece en forma de amoníaco. La estequiometría de un sistema en el que ocurre nitrificación queda definida por la ecuación 5.28, en la que se indica que la nitrificación en el proceso de digestión aerobia incrementa la concentración de iones de hidrógeno y, por lo tanto, provoca una reducción en el pH si el lodo no tiene la suficiente capacidad amortiguadora. Al igual que en el proceso de lodos activados, durante la digestión aerobia se eliminan aproximadamente 7.1 kg de alcalinidad por kilogramo de amoníaco oxidado. En ocasiones, el pH puede disminuir hasta valores por debajo de 5.5 durante periodos prolongados de aeración; sin embargo, no hay evidencias de que afecte al proceso (WPCF, 1985).

Las ecuaciones 5.27 y 5.28 indican que para degradar un kilogramo de biomasa activa se requieren teóricamente 1.4 kg de oxígeno en un sistema sin nitrificación y 1.98 kg de oxígeno en un sistema nitrificante. El requerimiento real de oxígeno depende de factores como temperatura de operación, proporción de lodos primarios y tiempo de retención celular en el sistema de lodos activados (WPCF, 1985).

5.2.2 Descripción del proceso

La digestión aerobia mesofílica con sistemas de aeración con aire, llamada digestión aerobia convencional, es la forma de operación más común para digestión aerobia; sin embargo, en los últimos años se han estudiado algunas variaciones del proceso para elevar su eficiencia. La más notable de ellas, es la digestión aerobia autotérmica en la que se aprovecha el calor generado por los microorganismos para operar el sistema en el intervalo termofílico (WPCF, 1985). A continuación se describen ambas variantes del proceso.

5.2.2.1 Digestión aerobia convencional

El proceso de digestión aerobia convencional, o digestión aerobia mesofílica, se lleva a cabo a temperaturas entre 20 y 30°C. Originalmente fue diseñado para operar intermitentemente, pero los sistemas de operación continua han tenido mayor éxito (EPA, 1979). En ambos métodos de operación, el lodo se envía generalmente al digester directamente de los sedimentadores primario y/o secundario.

En la digestión aerobia de operación intermitente, el lodo se mantiene bajo aeración durante el período de llenado del tanque y, cuando el digester está lleno, la aeración continúa durante dos o tres semanas para asegurar la estabilización completa del residuo. Una vez que se extrae suficiente lodo digerido y/o sobrenadante, se repite el ciclo; es común que entre cada ciclo se deje algo de lodo estabilizado en el aerador para mantener en el sistema la población microbiana necesaria para la degradación. Por su simplicidad de operación se recomienda en instalaciones que manejen pequeños volúmenes de lodo (WPCF, 1985).

La digestión aerobia de operación continua es un proceso muy similar al sistema de lodos activados. El sistema de aeración opera continuamente a un nivel fijo. El proceso requiere de un sedimentador en el que se separa el líquido clarificado y el lodo digerido; parte de éste, se recircula al tanque de digestión y la otra parte se extrae para su tratamiento posterior o disposición final. La figura 5.10 presenta el diagrama de flujo de un proceso de digestión aerobia convencional de operación continua.

La aeración con oxígeno puro en lugar de aire mejora la eficiencia de digestión. Generalmente se lleva a cabo en digestores cerrados, en los que se eleva la temperatura de operación por la naturaleza exotérmica del proceso. La principal desventaja de la aeración con oxígeno son sus altos costos.

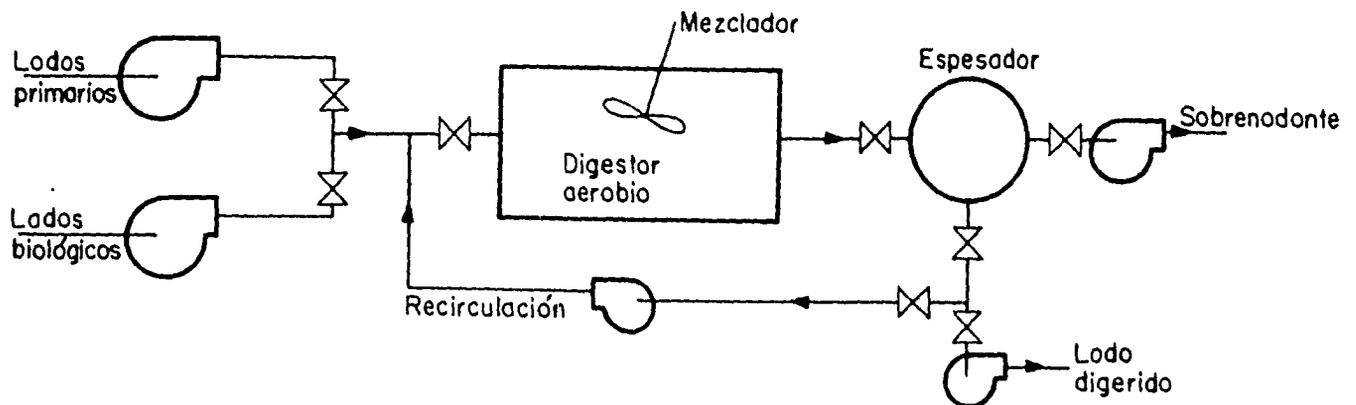


Fig. 5.10 Diagrama de flujo de digestión aerobia convencional de operación continua

5.2.2.2 Digestión aerobia termofílica

Una variante importante del proceso convencional se lleva a cabo mediante el aprovechamiento del calor liberado durante la degradación aerobia, que es suficiente para elevar la temperatura del líquido en el digester hasta 60° C, y es factible operar en el intervalo termofílico de los microorganismos (40 - 60°C). En esta modificación, también llamada digestión aerobia autotérmica, generalmente se emplea aeración con oxígeno puro para elevar su eficiencia y asegurar la máxima actividad biológica (WPCF, 1985). Es necesario que el lodo se espese previamente para alimentarlo al digester a concentraciones de sólidos mayores que 4% (EPA, 1979).

En este intervalo de operación las tasas de destrucción de sólidos orgánicos aumentan y, por lo tanto, se requieren tanques de menor volumen; asimismo, el oxígeno necesario es entre 30 y 40% menos que el requerido por el proceso mesofílico, debido a que en el intervalo termofílico, existen muy pocas bacterias nitrificantes (EPA, 1979). Otras ventajas son la obtención del lodo prácticamente desinfectado por pasteurización, la disminución del tiempo de retención celular para obtener determinada reducción de sólidos y su efecto de acondicionamiento para la deshidratación al mejorar la separación sólido-líquido, por la reducción en la viscosidad del líquido (Matsch y Drnevich, 1977). Algunas desventajas son la necesidad de incorporar un sistema de espesamiento, los mayores requerimientos de mezclado debido al alto contenido de sólidos, y que los sistemas que no utilizan oxígeno puro requieren un dispositivo de aeración extremadamente eficiente y tanques aislados (EPA, 1979).

Este proceso se autoregula con respecto a la temperatura debido a que a temperaturas mayores baja la actividad de los organismos y, por consiguiente, el calor liberado y la temperatura de operación. Este proceso es relativamente estable ya que se recupera con rapidez ante variaciones ligeras de las condiciones de operación; sin embargo se tiene poca experiencia en sistemas a gran escala (WPCF, 1985).

5.2.3 Consideraciones de diseño

Algunas consideraciones importantes en las que generalmente se basa el diseño de un proceso de digestión aerobia son las siguientes: temperatura de operación, transferencia de oxígeno y requerimientos de mezclado, tiempo de retención celular y volumen del tanque, método de operación, etc. A continuación se describe su influencia en el proceso en sistemas de digestión aerobia convencional, es decir, aquellos que operan entre 20 y 30°C y que utilizan aire como fuente de oxígeno para la actividad biológica.

5.2.3.1 Características del lodo

La digestión aerobia es ampliamente utilizada para estabilizar lodos biológicos, pero también se emplea para mezclas de éstos con lodos primarios. Sus principios microbiológicos son similares a los del proceso de lodos activados y, en general, se aplican los mismos criterios en cuanto a variaciones en las características del influente y a niveles de sustancias tóxicas en ambos procesos, aunque en la digestión aerobia se genera cierto efecto amortiguador, como resultado de los procesos de tratamiento anteriores. La acumulación de metales pesados en lodos activados, que ocurre por su precipitación y adsorción a valores de pH mayores que 7, puede causar efectos tóxicos en el sistema de digestión aerobia debido a la resolubilización de estos metales bajo condiciones de pH menores.

La concentración de sólidos en el lodo crudo es determinante en el diseño del proceso. Si se alimenta el lodo previamente espesado, el proceso requiere más oxígeno por unidad de volumen de digestor y los tiempos de retención celular para conseguir determinado nivel de estabilización serán mayores; sin embargo, se requiere menos volumen en el digestor, se tiene mayor control sobre el proceso y, subsecuentemente, los niveles de destrucción de material orgánico aumentan.

5.2.3.2 Temperatura de operación

La temperatura de operación en la digestión aerobia es un factor crítico para el buen funcionamiento de proceso. Debido a que la mayoría de los digestores aerobios son abiertos, la temperatura del líquido está sujeta a variaciones ocasionadas por cambios en las condiciones ambientales. Al igual que en la mayor parte de los procesos biológicos, en el proceso de digestión aerobia las temperaturas más altas incrementan la tasa de eliminación de material orgánico, y las más bajas retardan el proceso; sin embargo, en este caso el proceso se inhibe a temperaturas mayores que una temperatura crítica (WPCF, 1985). Hartman *et al* (1979) informa que la tasa máxima de eliminación de sólidos volátiles se alcanza a una temperatura de 30°C y va disminuyendo conforme se incrementa la temperatura.

Cuando se considera el efecto de la temperatura es importante que el digestor se diseñe para minimizar pérdidas de calor, por ejemplo, utilizando tanques de concreto en vez de acero inoxidable y utilizando sistemas de aeración profunda para asegurar que la estabilización sea lo más eficiente posible, aún durante las temperaturas esperadas más bajas y que el sistema cuente con el oxígeno necesario, aún durante las temperaturas más altas.

5.2.3.3 Transferencia de oxígeno y requerimientos de mezclado

Durante el proceso de digestión aerobia se requiere oxígeno para llevar a cabo las transformaciones bioquímicas necesarias, es decir, para la respiración exógena y endógena de los microorganismos. Para favorecer la correcta transferencia de oxígeno es necesario contar con un adecuado sistema de mezclado, para asegurar suficiente contacto entre el oxígeno, los microorganismos y la materia orgánica contaminante (sustrato exógeno). Generalmente, al introducir aire al sistema (aeración) se produce cierta acción de mezclado, por lo que estos parámetros se interrelacionan.

Las ecuaciones 5.27 y 5.28 indican que en teoría, se requieren entre 1.4 y 1.98 kg de oxígeno para degradar un kilogramo de biomasa, dependiendo de si el proceso nitrifica o no. Algunos estudios en planta piloto y a gran escala indican que el consumo real de oxígeno fluctúa entre 1.74 y 2.07 kg por kg de biomasa destruida (EPA, 1979). En el diseño de sistemas de digestión aerobia mesofílica se recomienda un valor estándar mínimo para dicho consumo de oxígeno de 2.0 para la estabilización de lodos biológicos y, cuando se trata de mezclas con lodos primarios, se recomienda entre 1.6 y 1.9 kg de oxígeno adicional por kg de biomasa destruida, para convertir el sustrato exógeno a material celular y para satisfacer las demandas para la respiración endógena de la masa bacteriana resultante (WPCF, 1985). Otros estudios indican que es necesario mantener una concentración mínima de oxígeno disuelto de 1.0 mg/l (EPA, 1979).

Normalmente los requerimientos de oxígeno para sistemas de digestión aerobia representan caudales de aire entre 0.25 y 0.33 l/m³s para lodos biológicos, y entre 0.4 y 0.5 l/m³s para mezclas de con lodos primarios (WPCF, 1985).

El mezclado, además de mantener los sólidos en suspensión, ayuda a transportar el líquido desoxigenado continuamente hacia el sistema de aeración. Los requerimientos típicos de mezclado en un proceso de digestión aerobia convencional fluctúan entre 10 y 100 W/m³ de digestor, dependiendo del dispositivo; sin embargo, antes de determinar los requerimientos de mezclado de diseño es conveniente consultar algún fabricante con experiencia en equipos de aeración (WPCF, 1985).

El mezclado y la transferencia de oxígeno se llevan a cabo generalmente por medio de aeradores mecánicos. Cualquiera de ambos procesos que requiera mayor consumo de potencia dictaminará el tamaño del equipo de aeración.

Generalmente, en los sistemas que tratan estrictamente lodos biológicos, el nivel de mezclado está determinado por la capacidad de transferencia de oxígeno del equipo; sin embargo, cuando se tratan mezclas se requiere oxígeno adicional para compensar el consumo por la respiración exógena de los microorganismos y, en la mayoría de los casos, esto determinará las dimensiones del equipo.

5.2.3.4 Tiempo de retención celular

El volumen de digestión que requiere este proceso es función del tiempo de retención celular (TRC) necesario para alcanzar determinada reducción de sólidos orgánicos; por ejemplo, para conseguir reducciones entre 40 y 50% del material orgánico en condiciones normales, se requiere proporcionar al sistema un tiempo de retención celular entre 10 y 12 días a una temperatura aproximada de 20°C (Metcalf, 1979). El tiempo de retención celular se define como la cantidad de sólidos suspendidos que permanecen en el digester dividida por la cantidad de sólidos suspendidos que se descarga del digester por unidad de tiempo. En promedio, la concentración de sólidos suspendidos en el digester es igual al 70% de la concentración en el lodo espesado (EPA, 1979).

En general, la reducción de materia orgánica aumenta con el TRC; sin embargo, después de cierto valor típico la tasa de oxigenación disminuye considerablemente, de manera que no es costeable continuar la digestión después de dicho valor de TRC. En algunos estudios se informa que en sistemas que operan continuamente con largos tiempos de retención celular, la deshidratación del lodo digerido en equipo mecánico es deficiente (EPA, 1979).

En este proceso, la reducción de sólidos volátiles biodegradables se describe típicamente mediante la siguiente reacción bioquímica de primer orden:

$$dM / dt = K_d M \quad (5.29)$$

donde:

dM / dt	Velocidad del cambio en la concentración de sólidos volátiles biodegradables, [masa/volumen tiempo]
K_d	Constante cinética de reacción, [tiempo ⁻¹]
M	Concentración remanente de sólidos volátiles biodegradables a un tiempo t , [masa/volumen]

En la digestión aerobia, el factor tiempo de la ecuación 5.29 equivale al tiempo de retención celular o edad del lodo. Dependiendo de los factores como el método de operación, temperatura de operación, tiempo de retención celular en el sistema de

lodos activados, etc. el TRC en este proceso de digestión puede ser igual o mayor que el tiempo teórico de retención hidráulica.

La constante cinética de reacción es función del tipo de lodo, temperatura de operación, TRC en el sistema de lodos activados, y de la concentración de sólidos en el digestor. La figura 5.11 presenta algunos valores típicos de dicha constante y su comportamiento general en función de la temperatura.

Otro factor que se relaciona con el porcentaje de reducción del material orgánico es el producto entre la temperatura y la edad del lodo (ver figura 5.12). Mediante esta relación puede estimarse el tiempo de retención celular requerido en el sistema, utilizando el porcentaje deseado de reducción de materia orgánica y la temperatura de operación aproximada. Con base en datos obtenidos en plantas piloto, algunos estudios han demostrado que cuando dicho producto excede un valor de 250 en un intervalo de temperatura entre 10 y 20°C, la reducción adicional en los sólidos volátiles es relativamente baja (Mavinic y Koers, 1979).

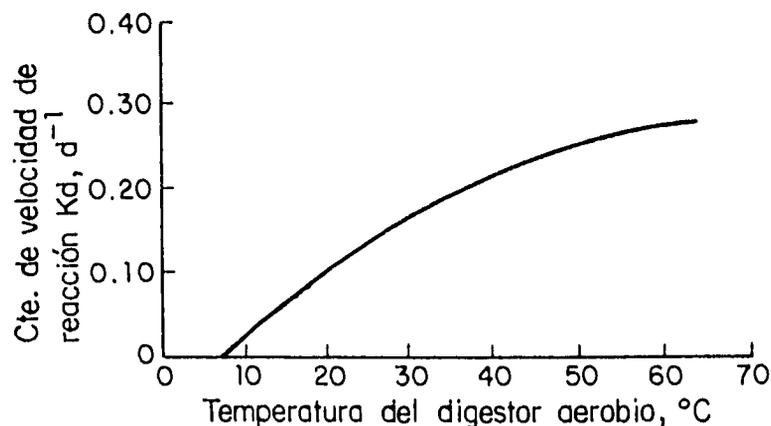


Fig. 5.11 Constante cinética en un proceso de digestión aerobia en función de la temperatura de operación (WPCF, 1985).

Benfield y Randall (1980) proponen algunas ecuaciones para estimar el tiempo de digestión requerido, con base en la cinética del proceso y en la consideración de que una fracción de los sólidos volátiles no es biodegradable y una fracción de los sólidos no volátiles se solubiliza como resultado de la dialisis del material celular contenido en el lodo. La ecuación básica es la siguiente:

$$t_d = \frac{(X_i - X_e) + (Y S_a)}{(K_d D X_a X_i)} \quad (5.30)$$

donde:

- t_d tiempo de digestión, en d
- X_i sólidos suspendidos totales en el influente, en mg/l
- X_e sólidos suspendidos totales en el efluente, en mg/l
- X_a biomasa activa biodegradable en el influente, en %
- K_d constante cinética de primer orden para la fracción biodegradable de la biomasa activa, en d^{-1}
- D fracción de la biomasa activa biodegradable del influente que permanece en el efluente, en %
- Y coeficiente de rendimiento para el contenido orgánico del lodo primario, en kg/kg
- S_a DBO última del lodo primario en el efluente del digestor, en mg/l

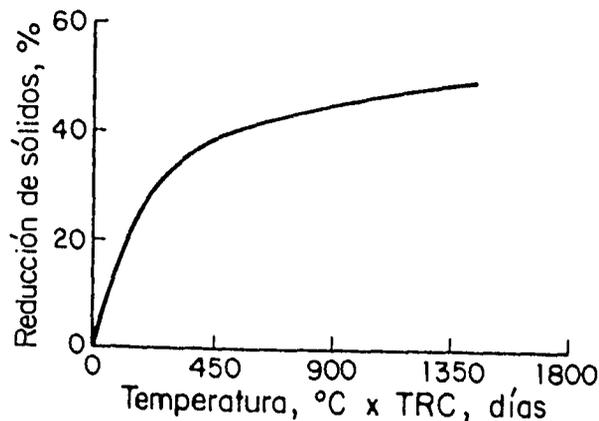


Fig. 5.12 Reducción de sólidos volátiles en un proceso de digestión aerobia convencional como función del producto entre la temperatura de operación y la edad del lodo (WPCF, 1985).

Los factores Y y S_a representan la conversión de la materia orgánica contaminante a material celular. Dichos factores deben incluirse en la ecuación 5.30 cuando se trate de mezclas de lodos primarios y secundarios; los demás factores corresponden a valores característicos de la mezcla. Cuando se tratan exclusivamente lodos biológicos, los factores Y y S_a son iguales a cero y los demás parámetros corresponden a los lodos biológicos.

La ecuación 5.30 supone que para determinada reducción de sólidos y carga orgánica constante, el tiempo de retención celular debe incrementarse conforme disminuye la fracción de biomasa activa en el influente; sin embargo, la experiencia indica que esta tendencia no se mantiene en sistemas con una fracción de biomasa activa muy pequeña, como es característico en sistemas de aeración extendida (WPCF, 1985). Para estos sistemas, los tiempos de retención celular pueden ser menores que los calculados mediante la ecuación 5.30.

Una vez estimado el tiempo de retención celular puede calcularse el volumen necesario para el digestor mediante la ecuación siguiente:

$$V = \frac{Q_i (X_i + Y S_i)}{X (K_d P_v + 1/TRC)} \quad (5.31)$$

donde:

- V volumen del digestor, en l
- Q_i caudal promedio del influente, en l/d
- X_i sólidos suspendidos en el influente, en mg/l
- Y fracción de DBO en el influente correspondiente a lodos primarios crudos, en %
- S_i DBO₅ en el influente, en mg/l
- X sólidos suspendidos en el digestor, en mg/l
- K_d constante cinética de primer orden, en d⁻¹
- P_v fracción de sólidos suspendidos volátiles en el digestor, en %
- TRC tiempo de retención celular, en d

La ecuación 5.31 no debe utilizarse para sistemas en los que se espere nitrificación significativa (WPCF, 1985). Si la digestión se lleva a cabo exclusivamente con lodos biológicos, el término $Y S_i$ de dicha ecuación es igual a cero.

5.2.3.5 Otras consideraciones

Reducción de pH

Si el proceso se lleva a cabo con oxígeno suficiente y se le da el tiempo de retención necesario, el nitrógeno amoniacal contenido en el lodo seguirá el proceso de nitrificación para formar nitratos. Esto ocasiona una disminución en el pH y la alcalinidad como resultado de la formación de ácidos que ocurren durante la nitrificación. Si el digestor cuenta con equipo separado para el mezclado y la aeración, es posible que el proceso desnitrifique si durante el llenado del tanque se opera únicamente con el equipo de mezclado (WPCF, 1985).

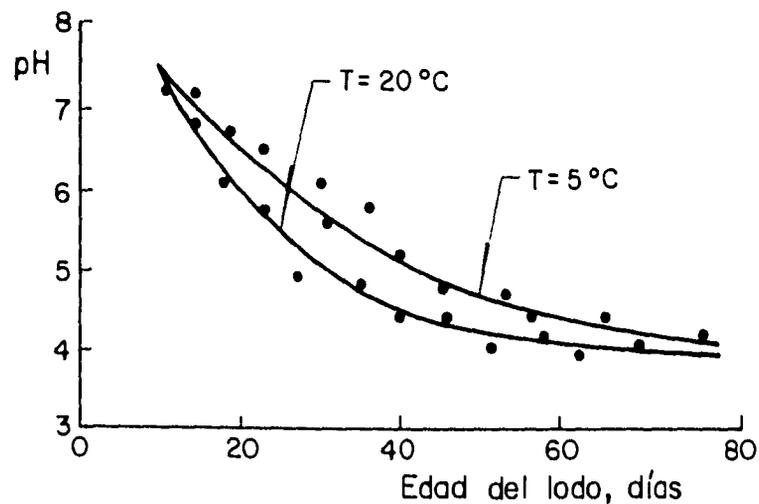


Fig. 5.13 Efecto de la edad del lodo en el pH durante un proceso de digestión aerobia a diferentes temperaturas del líquido (EPA, 1979).

Aunque es recomendable controlar el pH y la capacidad amortiguadora del sistema y mantenerlos dentro de los intervalos normales de operación, se ha comprobado que los microorganismos aerobios son capaces de aclimatarse a valores de pH más

bajos, siempre y cuando éste no disminuya repentinamente y/o el descenso no exceda valores por debajo de 5.5 aproximadamente (WPCF, 1985).

Generalmente, cuando se opera a bajas temperaturas del líquido y cortos tiempos de retención, o bien a temperaturas que corresponden al intervalo termofílico, no se efectúa el proceso de nitrificación, pero el pH disminuye ligeramente. Esto sucede debido a que las bacterias nitrificantes son sensibles al calor y no sobreviven a temperaturas mayores de 45°C (EPA, 1979).

La figura 5.13 presenta el efecto del incremento del tiempo de retención en el pH del lodo, en un proceso de digestión aerobia operando en el intervalo mesofílico.

Calidad del sobrenadante

El sobrenadante o efluente de los digestores aerobios normalmente se recircula a la sección de tratamiento de líquido y su cantidad y calidad debe revisarse y controlarse continuamente para evitar trastornos en el proceso; sin embargo, a diferencia del proceso de digestión anaerobia, su impacto en el sistema de tratamiento secundario es relativamente bajo.

TABLA 5.13 CARACTERISTICAS DEL EFLUENTE DE UN SISTEMA DE DIGESTION AEROBIA MESOFILICA (WPCF, 1985).

Parámetro	Intervalo	Valor típico
pH	5.9 - 7.70	7.0
DBO ₅ , mg/l	9 - 1,700	500
DBO ₅ filtrado, mg/l	4 - 183	50
DQO, mg/l	288 - 8,140	2,600
sólidos suspendidos, mg/l	46 - 11,500	3,400
N-org, mg/l	10 - 400	170
NO ₃ -N, mg/l	-	30
fósforo total, mg/l	19 - 241	100
fósforo soluble, mg/l	2.5 - 64	25

La tabla 5.13 presenta intervalos y valores típicos de algunos parámetros del sobrenadante descargado de un proceso de digestión aerobia. Debe notarse que la concentración de sólidos suspendidos puede ser alta; sin embargo, la mayor parte

de ellos son sólidos estabilizados que al ser recirculados, normalmente son fácilmente eliminados durante el tratamiento primario.

Método de operación

Como se mencionó en la sección 5.2.2.1 la digestión convencional puede operar de forma continua o intermitente.

En el método de operación intermitente la frecuencia de extracción del lodo digerido y el sobrenadante está determinada por la tasa de alimentación de lodo y por el tiempo de retención celular deseado. Para dar flexibilidad al equipo, es recomendable equipar el digestor con varias salidas para el sobrenadante (WPCF, 1985).

TABLA 5.14 PARAMETROS DE DISEÑO PARA SISTEMAS DE DIGESTION AEROBIA

Parámetro	Valor
Tiempo de retención hidráulica a aproximadamente 20°C ^a , d	
Exceso de lodos activados	10 - 15
Exceso de lodos activados sin tratamiento primario	12 - 18
Mezcla de lodos primarios y secundarios ^b	15 - 20
Sólidos suspendidos volátiles, kg/m ³ •d	1.6 - 4.8
Requerimientos de oxígeno, kg/kg de sólidos destruidos	
Material celular ^c	aproximadamente 2.3
DBO ₅ en lodos primarios	1.6 - 1.9
Requerimientos de energía para mezclado	
Equipo mecánico de oxigenación, W/m ³	20 - 40
Sistemas de difusión de aire, l/m ³ •s	0.33 - 0.67
Oxígeno disuelto en el digestor, mg/l	1 - 2
Reducción en sólidos suspendidos volátiles, %	40 - 50

^a Los tiempos de retención deben aumentar a temperaturas menores;

^b Se utilizan tiempos de retención similares para lodos primarios;

^c Suponiendo que ocurre nitrificación.

La operación continua permite regular la alimentación y extracción del lodo y sobrenadante, sin necesidad de detener el equipo de oxigenación y aeración. En este método el llenado del tanque, la aeración y el decantado son operaciones continuas que pueden producir un tiempo de retención celular mayor para un

determinado volumen del tanque. Normalmente los digestores están equipados con tanques para la separación del lodo digerido y el sobrenadante, que comúnmente se diseñan como espesadores por gravedad. El intervalo normal para la carga de sólidos al espesador es de 25 a 50 kg/m³d, y la concentración de sólidos en el lodo espesado de un sistema de digestión aerobia de operación continua generalmente varía entre 2 y 4% (WPCF, 1985).

La tabla 5.14 presenta un resumen de valores típicos de algunos parámetros clave para el diseño de sistemas de digestión aerobia. Estos valores son representativos en condiciones normales, pero deben ser revisados y considerados cuidadosamente antes de emplearse en el diseño de un sistema específico.

5.2.4 Descripción del equipo

5.2.4.1 Tanques

Los digestores aerobios son normalmente tanques cilíndricos o rectangulares descubiertos, construidos de concreto. Los factores de diseño utilizados para determinar el volumen del tanque deben ser evaluados cuidadosamente para evitar un sobredimensionamiento y por consiguiente, un gasto de energía excesivo por los altos requerimientos de aeración y mezclado.

En la mayoría de los sistemas de digestión aerobia se sugiere incluir cuando menos dos tanques de aeración, para dar suficiente flexibilidad al proceso y permitir el mantenimiento y/o reparaciones en el equipo.

Se recomienda que el fondo del tanque esté inclinado hacia el centro para facilitar la acumulación y extracción del lodo digerido; normalmente, la pendiente del fondo varía entre 1:12 y 1:13 (WPCF, 1985). La profundidad del tanque es similar a la de sistemas de lodos activados; sin embargo, en este caso debe proporcionarse mayor altura en el bordo libre considerando la formación de nata y espuma que es común

en este proceso. Se sugiere una altura para el bordo libre entre 1 y 3 m (WPCF, 1985).

5.2.4.2 Equipo de aeración

Uno de los factores más importantes para el buen funcionamiento de un sistema de digestión aerobia es el equipo de aeración, que debe ser suficiente para proporcionar la oxigenación y el mezclado necesarios. Se han empleado con éxito tres tipos de sistemas de aeración: difusores de aire, aeración mecánica superficial y aeradores sumergidos de turbina (WPCF, 1985).

Normalmente, los difusores de aire se localizan cerca del fondo del tanque y a lo largo de uno de sus costados, de manera que la circulación del lodo del digestor siga una trayectoria en espiral, pero también pueden utilizarse difusores montados en el piso del digestor. En general, se requieren entre 0.25 y 0.33 l de aire/m³ de lodos para cubrir las necesidades de oxígeno; sin embargo, para asegurar un mezclado eficiente se recomienda aplicar entre 0.33 y 0.67 l de aire/m³ de lodo por segundo (WPCF, 1985).

La aeración mediante difusores de aire ofrece las ventajas siguientes: la transferencia de oxígeno puede ser controlada mediante la variación de la velocidad de suministro de aire; al introducir aire a presión al sistema se eleva la temperatura, con el subsecuente aumento de la actividad biológica de los microorganismos; se presentan menos problemas causados por la formación de espuma y natas, que en digestores que operan con otros sistemas de aeración; se minimizan las pérdidas de calor porque en la superficie la turbulencia es relativamente baja.

Sin embargo, las variaciones en la transferencia de oxígeno y en la eficiencia de mezclado, así como la facilidad para que se atasquen las salidas de aire, pueden causar problemas graves que generalmente son mayores que las ventajas. Siempre que se utilicen estos dispositivos, es importante que el sistema cuente con líneas de aire a presión para la limpieza regular de los difusores, y que éstos puedan ser desmontados con facilidad.

Al utilizar difusores de aire es importante tomar en cuenta también que las pérdidas potenciales de calor pueden ser significativas. Estas son resultado principalmente de la evaporación causada por el gas, que al pasar a través del digestor arrastra vapor de agua y calor (equivalente al calor latente de vaporización) del lodo.

Los aeradores mecánicos superficiales ofrecen una eficiencia de transferencia de oxígeno relativamente alta y normalmente requieren poco mantenimiento. Generalmente son unidades flotantes de alta o baja velocidad; este último diseño es el más empleado en sistemas de digestión aerobia. Algunas desventajas que comúnmente se le atribuyen a la aeración superficial son las siguientes: la falta de control sobre la tasa de oxigenación; fallas en el funcionamiento si se presenta excesiva formación de espuma; aumentan los problemas causados por la formación de espuma y las pérdidas de calor debido a la alta turbulencia en la superficie.

Los aeradores mecánicos sumergidos combinan ventajas y eliminan algunas desventajas de los dos sistemas anteriores. La tasa de transferencia de oxígeno puede ser controlada variando el caudal de aire al impulsor; es poco sensible a la formación de espuma debido a que el impulsor se mantiene sumergido; se reduce la disipación de calor de los aeradores superficiales (WPCF, 1985).

Para reducir el consumo de energía es conveniente asegurarse de que la geometría del tanque y el equipo de aeración sean compatibles y procurar que el sistema cuente con un dispositivo para controlar la entrada de oxígeno.

5.2.5 Procedimiento de diseño

Antes de diseñar un proceso de digestión aerobia es importante contar con información acerca del tipo y cantidad de lodo que será estabilizado, y cuando menos los siguientes datos: intervalo de temperaturas esperado en el digestor, caudal promedio, porcentaje de reducción de sólidos a la temperatura mínima de operación, concentración de sólidos esperada en la alimentación de lodo, concentración de sólidos en el lodo digerido.

Con base en las características del lodo y caudal promedio, debe estimarse la cantidad esperada de lodos químicos, lodos primarios y/o biológicos. Es importante conocer también el porcentaje aproximado de material volátil. Esto puede estimarse mediante las ecuaciones 5.24 a 5.26.

A continuación se describe el procedimiento común para el diseño de un sistema de digestión aerobia convencional:

- 1/ Estimar el caudal máximo y promedio del lodo.
- 2/ Estimar el porcentaje de sólidos volátiles en la mezcla.
- 3/ Estimar el tiempo de retención celular aproximada, a partir de la reducción de materia volátil deseada y la temperatura mínima esperada, utilizando la figura 5.12.
- 4/ Calcular el porcentaje de reducción de sólidos volátiles a la temperatura máxima de operación mediante el tiempo de retención celular estimado en el inciso y la figura 5.12.
- 5/ Calcular la cantidad de sólidos eliminada por día en condiciones de temperatura mínima y máxima, mediante la respectiva reducción de sólidos volátiles y la cantidad de sólidos volátiles que se alimentan diariamente.
- 6/ Calcular los requerimiento de oxígeno utilizando un factor de 2 kg de O₂/kg de sólidos suspendidos eliminados si se espera nitrificación. Debe asegurarse que la concentración de oxígeno disuelto, sobre todo a temperaturas de operación mayores, se mantenga cuando menos en 1 mg/l.
- 7/ Calcular el tiempo de retención celular mediante la ecuación 5.30.
- 8/ Calcular el volumen del tanque mediante la ecuación 5.31. Las dimensiones reales del tanque dependerán del equipo de aeración utilizado.
- 9/ Calcular el tiempo de retención hidráulica teórico, multiplicando el volumen del tanque por el caudal de alimentación de lodo entre su concentración de sólidos.
- 10/ Elegir el tipo de aeradores para el mezclado y transferencia de oxígeno.

5.2.6 Operación y mantenimiento

Una de las principales ventajas de la digestión aerobia comparada, sobre todo comparada con la digestión anaerobia, es que su operación es relativamente sencilla. El proceso prácticamente se automantiene ya que las condiciones biológicas estándar del sistema (control de pH y temperatura, exclusión de sustancias tóxicas, etc.) son comparables a las de un sistema de lodos activados.

Las labores de operación se concretan prácticamente a revisar el funcionamiento del equipo mecánico, a la determinación periódica de la concentración de sólidos y oxígeno disuelto en las diferentes corrientes, y a labores de limpieza en general; sin embargo, es posible que se presenten problemas por la excesiva formación de natas y/o espuma, especialmente en sistemas que utilizan aeradores superficiales. Estos problemas pueden ser causados por cargas orgánicas altas asociadas a altas temperaturas de operación, o por un crecimiento excesivo de bacterias en forma de filamentos. Generalmente, pueden controlarse mediante sistemas rociadores de agua e incluso, si el problema es severo, aplicar ocasionalmente al agua algún producto químico antiespumante (WPCF, 1985).

Si se emplean aeradores mecánicos es conveniente revisarles periódicamente el nivel de aceite y cambiarlo cuando menos una o dos veces al año (EPA, 1979).

5.3 Tratamiento con cal

La estabilización química de lodos de aguas residuales domésticas mediante tratamiento con cal, es una buena alternativa a los procesos biológicos, sobre todo en plantas que operan con caudales entre 4 y 1400 l/s (WPCF, 1985). Su aplicación hace posible que el lodo estabilizado sea adecuado para su disposición en tierra, ya sea en relleno sanitario, o en suelos forestales o de cultivo. Este método se recomienda ampliamente en los siguientes casos:

- En plantas pequeñas asociadas a una baja producción de lodos, o que cuenten con terreno suficiente para que su disposición final no cause problemas considerables.
- En plantas que planean almacenar el lodo antes de enviarlo a otras instalaciones para su tratamiento y/o disposición posterior.
- En plantas que utilizan otros sistemas de estabilización y requieren un método alternativo provisional para tratar un exceso de lodos durante períodos de carga pico o durante las operaciones de limpieza y/o mantenimiento del equipo.

5.3.1 Teoría

Cal es un término aplicado a algunos compuestos químicos fuertemente alcalinos. Las dos formas comerciales disponibles son la cal viva u óxido de calcio (CaO) y cal hidratada o hidróxido de calcio (Ca(OH)_2). Sus características principales se presentan en la tabla 5.15.

La cal viva que normalmente se utiliza en el tratamiento de aguas es previamente hidratada por los fabricantes mediante una reacción exotérmica en la que se aplica agua suficiente para producir un polvo blanco seco, llamado comúnmente "calhidra". Durante el proceso de hidratación de la cal viva, conocido como "apagado de la cal", las partículas gruesas de CaO se separan en partículas más pequeñas de Ca(OH)_2 altamente reactivas, cuya área superficial aumenta considerablemente. El producto contiene aproximadamente entre 85 y 90% de óxido de calcio y entre 10 y 15% de óxido de magnesio.

La estabilización con cal consiste esencialmente en elevar el pH en el residuo durante un tiempo de contacto suficiente para crear un medio ambiente fuertemente alcalino desfavorable para la actividad biológica. Durante el tratamiento también se alteran las propiedades físicas y químicas del lodo. A pesar de que la química del proceso aún no ha sido suficientemente estudiada, se sabe que se llevan a cabo algunas reacciones de saponificación, neutralización de ácidos

TABLA 5.15 CARACTERISTICAS DE LA CAL VIVA E HIDRATADA
(Adaptada de EPA, 1979).

	Cal viva, CaO	Cal hidratada, Ca(OH) ₂
Presentación	Lentejas, granallas, hojuelas y pulverizada	Polvo fino
Apariencia	Blanca (tono ligeramente grisáceo), aspecto no homogéneo	Polvo blanco, libre de grumos. Atraviesa la malla de 200-400
Propiedades	Inestable, cáustica, irritante. Se hidrata fácilmente liberando calor (aprox. 270 k-cal/kg). Con el aire forma CaCO ₃ Solución saturada a aprox. pH de 12.5	Cáustica, irritante. Absorbe agua y CO ₂ del aire para forma Ca(HCO ₃) ₂ Solución saturada a aprox. pH de 12.4
Densidad, kg/m ³	880 - 1200; para calcular la capacidad de la tolva utilizar 880	384 - 640; para calcular la capacidad de la tolva utilizar 480
Densidad relativa	3.2 - 3.4	3.2 - 3.4
Pureza comercial	70 - 96% CaO	82 - 98% Ca(OH) ₂ ; 62 - 74% CaO
Solubilidad en agua	Reacciona para formar entre 1.16 y 1.32 kg de Ca(OH) ₂ por kg de CaO	1.2 kg/m ³ a 21°C 0.3 kg/m ³ a 80°C

e hidrólisis de moléculas complejas (WPCF, 1985). Estas reacciones reducen el valor fertilizante del lodo, alteran las características de la corriente de líquido y generalmente mejoran la deshidratación si la cal se aplica conjuntamente con otros acondicionadores químicos como sales metálicas.

El medio alcalino que genera la aplicación de cal elimina o cuando menos inhibe la actividad de los microorganismos involucrados en la descomposición del material orgánico en el lodo. Durante la descomposición anaerobia de residuos se generan gases como nitrógeno y sulfuros que causan olores desagradables; el tratamiento con cal los reduce al detener la descomposición.

5.3.2 Descripción del proceso

La estabilización con cal es un proceso muy simple, cuyas ventajas más importantes sobre otras formas de estabilización son su simplicidad y bajos costos de operación. Consiste básicamente en el mezclado del lodo con la dosis de cal adecuada. La cal se aplica al lodo antes de su deshidratación o, menos comúnmente, a la torta de lodo deshidratado.

Normalmente, la estabilización del lodo húmedo se lleva a cabo mediante la aplicación de cal hasta alcanzar un pH de 12, manteniéndolo durante 2 horas por lo menos; sin embargo, la aplicación exclusiva de cal puede causar una deshidratación deficiente (WPCF, 1985). Westphal y Christensen (1981) proponen dos modificaciones al tratamiento convencional que ayudan a mejorar la deshidratación del lodo. La primera es incrementar la dosis de cal en un proceso de acondicionamiento convencional con sales de fierro y cal. La segunda consiste en la aplicación de cal viva seca a la torta de lodo deshidratado.

Esta última modalidad es menos empleada, pero ofrece algunas ventajas, sobre todo porque se reduce la cantidad de cal necesaria para la estabilización y porque la reacción de hidratación de la cal viva es exotérmica y la temperatura puede elevarse considerablemente (ver reacción 2.16). Normalmente se lleva a cabo mezclando la cal y la torta de lodo en un dispositivo de tornillo cerrado que transporta el lodo desde la unidad de deshidratación hasta donde se almacenará para su disposición final (Paulsrud y Eikum, 1984). En algunos casos, la dosis adecuada para elevar el pH entre 10 y 12.5 ha sido entre 200 y 500 kg de CaO/ton de sólidos secos; con esta dosis la temperatura puede elevarse hasta 40 - 70°C, o más si se proporciona un mezclado eficiente y se aísla el sistema (Paulsrud y Eikum, 1984). Debido a la evaporación por la alta temperatura y a la aplicación de sólidos adicionales, la concentración de sólidos en el lodo deshidratado aumentará aproximadamente entre 25 y 35%.

5.3.3 Consideraciones de diseño

Los tres parámetros fundamentales en el diseño de un sistema de estabilización con cal son: pH, tiempo de contacto y dosis. Los resultados y datos de operación, así como datos empíricos aplicados a instalaciones existentes, pueden utilizarse como referencia preliminar para el diseño de sistemas a gran escala, para establecer el tamaño del equipo y estimar costos; sin embargo, es recomendable efectuar estudios a nivel laboratorio o planta piloto siempre que sea posible, debido a que durante el tratamiento se llevan a cabo interacciones químicas complejas que pueden afectar al proceso de manera importante, sobre todo por variaciones en las condiciones de operación.

5.3.3.1 pH y tiempo de contacto

El principal objetivo de la estabilización con cal es inhibir la descomposición bacteriana y anular la actividad de los microorganismos patógenos. Se lleva a cabo mediante la aplicación de cal para elevar el pH en el lodo y crear un ambiente fuertemente alcalino.

Evidentemente, el pH (parámetro intensivo) y el tiempo de contacto o exposición (parámetro extensivo) son determinantes en el proceso. Ambos se relacionan directamente entre sí, debido a que el pH necesario debe mantenerse durante suficiente tiempo de contacto para lograr la estabilización. Normalmente, se recomienda mantener el pH sobre un valor 12 durante aproximadamente 2 horas y no permitir que descienda de 11 durante varios días (EPA, 1979; WPCF, 1985). Las consideraciones de diseño que se recomiendan para lograr estos objetivos son las siguientes (EPA, 1979):

- Tratar el lodo antes de su deshidratación;
- aplicar cal hasta un pH de 12.5 y mantenerlo durante 30 min (esto ayudará a mantenerlo sobre 12 durante dos horas por lo menos).

Después de la aplicación de la cal, el pH desciende gradualmente a lo largo de todo el proceso de estabilización, por lo que es importante que el pH inicial sea superior a 12. Sin embargo, no es necesario que el lodo permanezca en el recipiente o tanque de contacto durante el tiempo establecido, siempre y cuando se puedan obtener fácilmente muestras de lodo para determinar el valor de pH y asegurarse de que éste sea suficientemente alto y se mantenga durante el tiempo de contacto deseado.

El pH desciende de acuerdo con la secuencia siguiente: primero, se absorbe dióxido de carbono del aire (que forma un ácido débil cuando se disuelve en agua) que reacciona con la alcalinidad residual de la mezcla. Conforme se consume la alcalinidad, el pH comienza a disminuir. Eventualmente, se alcanza un pH en el cual vuelve a desarrollarse la actividad de los microorganismos y el pH continúa su descenso debido a la producción de ácidos orgánicos, de manera similar a lo ocurrido durante las transformaciones que se llevan a cabo durante el proceso de digestión anaerobia.

5.3.3.2 Dosis

La dosis de cal debe ser adecuada para proporcionar suficiente alcalinidad residual al lodo, de manera que el pH se mantenga sobre cierto nivel durante el período de almacenamiento anterior a su disposición final. Esto evitará los malos olores y la reactivación de los microorganismos patógenos que sobreviven.

La dosis óptima de cal depende de factores como: tipo de lodos (primarios, exceso de lodos activados, etc.), composición química de las fracciones sólida y líquida en el lodo (incluyendo contenido de material orgánico) y, concentración de sólidos. La tabla 5.16 presenta el intervalo de la dosis necesaria para mantener un pH de 12 durante 30 min para diferentes tipos de lodo en una planta para tratamiento de aguas residuales municipales en Ohio, EUA; estos valores han sido confirmados en varias investigaciones (WPCF, 1985).

TABLA 5.16 REQUERIMIENTO DE CAL PARA ALCANZAR UN VALOR DE pH DE 12 Y MANTENERLO DURANTE 30 min (WPCF, 1985)

Tipo de lodo	Concentración de sólidos, %		Dosis de cal, kg Ca(OH) ₂ /kg SS		pH, promedio	
	Intervalo	promedio	Intervalo	promedio	inicial	final
Lodos primarios	3 - 6	4.3	0.06 - 0.17	0.12	6.7	12.7
Lodos activados	1 - 1.5	1.3	0.21 - 0.43	0.30	7.1	12.6
Mezcla de lodos digeridos por vía anaerobia	5 - 7	5.5	0.14 - 0.25	0.19	7.2	12.4
Lodo séptico	1 - 4.5	2.7	0.09 - 0.51	0.20	7.3	12.7

SS sólidos secos

La Tabla 5.17 presenta la dosis recomendada por unidad de masa de sólidos secos para diferentes tipos de lodos para mantener un pH mayor a 11 durante por lo menos 14 días de almacenamiento a 20°C.

TABLA 5.17 DOSIS RECOMENDADA DE CAL PARA DIFERENTES TIPOS DE LODO (Paulsrud y Eikum, 1984).

Tipo de lodo	Dosis de cal, g Ca(OH) ₂ /kg SS
Lodos primarios	100 - 200
Lodos sépticos	100 - 300
Lodos activados	300 - 500
Mezcla PRI + LQ (Al, Fe)	250 - 400
Mezcla PRI + LQ (cal)	ninguna
Mezcla LA + LQ (Al, Fe)	300 - 600
Mezcla LA + LQ (cal)	ninguna

SS Sólidos secos

PRI lodos primarios; LA exceso de lodos activados; LQ lodos químicos

De acuerdo con las tablas 5.16 y 5.17, los lodos primarios requieren la dosis de cal más baja mientras que la más alta corresponde en promedio a los lodos activados y a los lodos químicos que contienen aluminio y/o hierro. Esto puede atribuirse a que en general la dosis requerida tiende a ser algo mayor en lodos diluidos que en los más concentrados, debido a la cal necesaria para elevar el pH del agua: aproximadamente 1 g/l para elevar el pH a 12 y 5 g/l para elevar el pH a 12.5 (WPCF, 1985). La composición química juega también un papel importante en la dosis requerida; Farrell *et al* (1974) sugiere la formación de algunos compuestos

complejos de calcio y aluminio en lodos químicos tratados con dichos metales, que consumen parte de la cal aplicada.

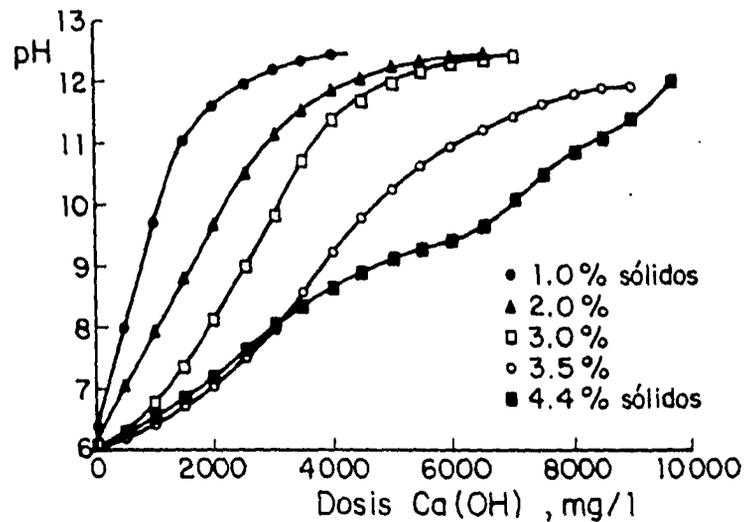


Fig. 5.14 Dosis de cal y pH de una mezcla de lodos primarios y secundarios a diferentes concentraciones de sólidos (EPA, 1979).

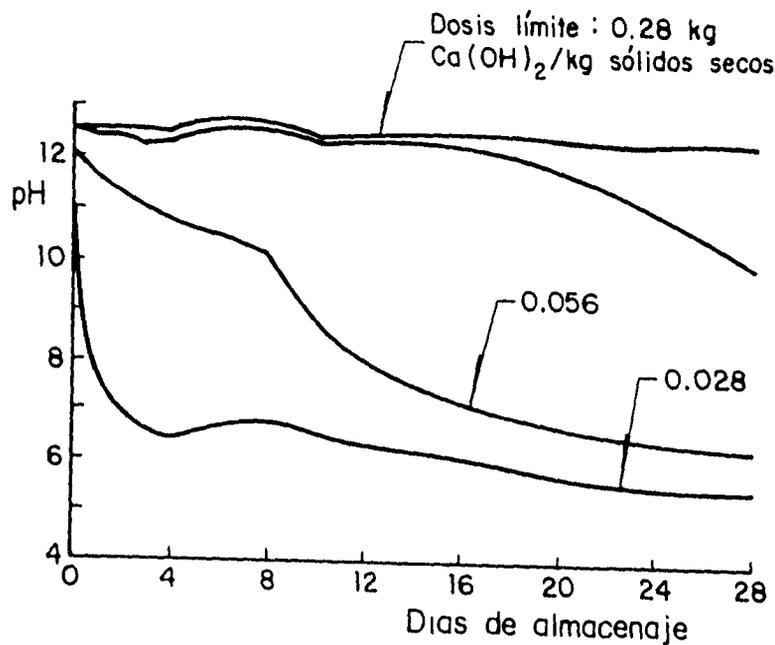


Fig. 5.15 Variación del pH con el almacenamiento de lodos primarios utilizando diferentes dosis de cal (WPCF, 1985).

Generalmente, conforme aumenta la concentración de sólidos en el lodo la dosis aumenta; sin embargo, la dosis requerida por unidad de masa de sólidos parece ser relativamente constante en un intervalo de concentración de sólidos entre 0.5 y 4.5%, común en lodos de aguas residuales (WPCF, 1985). La figura 5.14 presenta la dosis requerida para elevar el pH de una mezcla de lodos típicos de origen doméstico a diferentes concentraciones de sólidos.

Para prevenir la caída del pH con el almacenaje se recomienda aplicar un exceso de la dosis requerida para alcanzar el pH de 12, que en ocasiones puede llegar a ser hasta 1.5 veces dicha dosis (EPA, 1979). La figura 5.14 presenta la caída del pH en lodos primarios con respecto al tiempo de almacenamiento a diferentes dosis de cal.

5.3.4 Efectos del proceso

Los resultados esperados en un sistema adecuadamente diseñado y operado incluyen los siguientes: reducción de organismos patógenos, reducción significativa de olores desagradables, mejora la deshidratación (si se aplica en combinación con la dosis adecuada de sales inorgánicas), provoca cambios en la composición química del lodo y del sobrenadante y aumenta la cantidad de sólidos que deben ser manejados posteriormente.

Generalmente los patógenos, incluyendo coliformes fecales, totales, estreptococos fecales, *salmonella sp*, etc., pueden ser eliminados hasta en un 99% (Paulsrud y Eikum, 1984); con respecto a los virus hay poca información pero algunos estudios sugieren su rápida destrucción sobre un pH de 12. En contraste, algunos análisis cualitativos por observaciones al microscopio indican la supervivencia de microorganismos superiores como ciertos nemátodos, quistes de amibas o huevecillos de *Ascaris*, 24 horas después de la aplicación de cal suficiente para mantener un pH elevado (WPCF, 1985).

Los olores desagradables en el lodo, causados principalmente por las emisiones gaseosas de sulfuro de hidrógeno (H_2S), se reducen drásticamente. A pesar de que

cuando se inicia el mezclado o aeración el olor se intensifica, una vez que se aplica la cal el olor fuerte se reduce y es sustituido por olor a amoniaco inicial que se desprende, y después los olores desaparecen gradualmente. La figura 5.16 muestra que conforme aumenta el pH en el lodo, la fracción de sulfuro total en la forma de H_2S disminuye desde aproximadamente 50% a pH 7 hasta prácticamente cero a pH 9. Consecuentemente, sobre este valor de pH se eliminan los olores causados por H_2S ; sin embargo, si el pH disminuye los olores volverán a presentarse.

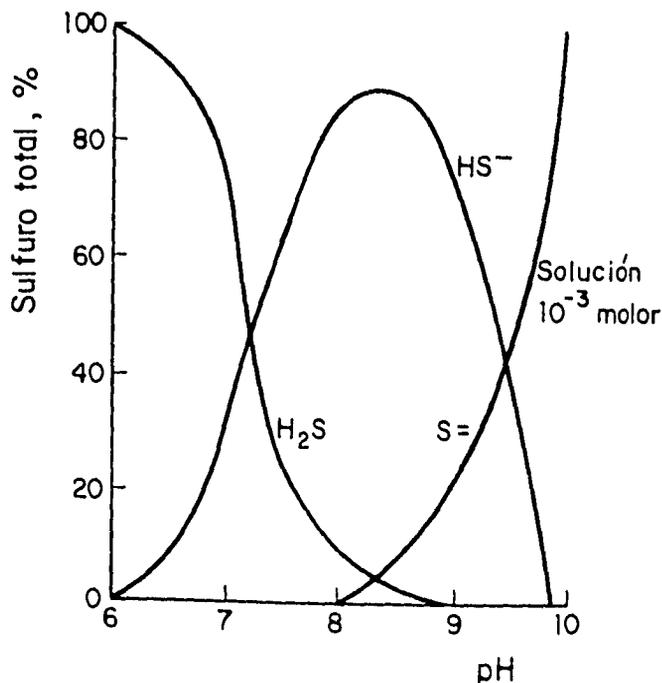


Fig. 5.16 Efecto del pH en el equilibrio sulfuro de hidrógeno-sulfuro (EPA, 1979).

La deshidratación del lodo puede mejorar con la estabilización con cal si se aplica en combinación con acondicionadores químicos como cloruro férrico o sulfato de aluminio. Algunos estudios en planta piloto indican que el lodo tratado con cal deshidrata más rápidamente en lechos de arena y produce una concentración de sólidos más alta en el lodo deshidratado que los lodos crudos (WPCF, 1985). El acondicionamiento con cal y sales de fierro mejora notablemente la deshidratación en sistemas mecánicos tanto para lodos primarios como para mezclas. La dosis de cal necesaria para la estabilización es generalmente mayor que la requerida como

acondicionamiento. Una posible desventaja de la deshidratación mecánica de lodos tratados con cal es la probable dificultad en el dimensionamiento del equipo debido a la alta dosis de cal.

Algunos cambios químicos que ocurren en el lodo durante el proceso son los siguientes (WPCF, 1985):

- La concentración de sólidos suspendidos volátiles se reduce entre 10 y 35% principalmente como resultado de la dilución con cal; sin embargo, se efectúa muy poca destrucción de materia orgánica;
- se incrementa la concentración de sólidos suspendidos totales como consecuencia de la aplicación de sólidos adicionales y la precipitación de sólidos disueltos;
- se reduce la concentración de fósforo disuelto debido a la reacción de los ortofosfatos para formar un precipitado de fosfato de calcio;
- la alcalinidad total se incrementa; y
- la concentración de nitrógeno disminuye debido a la liberación de amoníaco.

5.3.5 Instalaciones necesarias

Cuando se maneja cal u otros productos químicos cáusticos es importante que las instalaciones sean seguras y que se trabaje y opere el equipo tomando las precauciones pertinentes. Las instalaciones deben contar con regaderas y lavabos de fácil acceso.

Las operaciones principales asociadas con el tratamiento con cal son: el manejo de la cal, mezclado de cal con el lodo y el posible almacenamiento del lodo estabilizado. El equipo e instalaciones necesarias son relativamente sencillas. Es importante establecer la capacidad de almacenamiento de acuerdo con la cantidad de lodo que se maneja, interrupciones ocasionales, programas de mantenimiento de las instalaciones en general, etc.

Durante su almacenamiento la cal puede reaccionar con el dióxido de carbono del aire para formar carbonato de calcio que cubre la superficie de las partículas de cal, haciéndola menos reactiva y menos efectiva para elevar el pH. Por ello, debe ser almacenada en instalaciones secas y recipientes cerrados para evitar que entre en contacto con el aire. Generalmente se recomienda mantener cal almacenada para cubrir las necesidades cuando menos de una semana; sin embargo, la cal hidratada puede permanecer en buenas condiciones hasta un año aproximadamente si se mantiene en sus empaques originales cerrados.

El principal propósito del tanque de mezclado es permitir un mezclado adecuado del lodo crudo y la cal y proporcionar un suficiente tiempo de contacto. Generalmente se construye de acero y debe estar equipado con un sistema de mezclado para mantener los sólidos en suspensión y favorecer el contacto del lodo con la cal. Los sistemas más utilizados son por medio de difusión de aire y sistemas mecánicos.

El mezclado por difusión de aire ofrece dos ventajas importantes sobre los mezcladores mecánicos: la aeración contribuye a mantener el lodo fresco antes de la aplicación de cal en los sistemas de operación intermitente y es más probable que los mezcladores mecánicos se atasque y el equipo falle.

Los requerimientos de mezclado deben determinarse en cada caso básicamente de acuerdo con las determinaciones de pH. El mezclado puede ser intermitente o continuo de acuerdo con el tamaño de las instalaciones; en este último caso es más fácil mantener el pH elevado pero se requiere generalmente de un sistema de alimentación automático para la cal.

El diseño para el sistema de mezclado es similar al utilizado en sistemas de digestión aerobia (ver sección 5.2.3.3).

6. ACONDICIONAMIENTO PARA LA DESHIDRATACION

El acondicionamiento de lodos es un tratamiento físico o químico previo a su deshidratación que se lleva a cabo con el objeto de facilitar la eliminación de agua y, en la mayoría de los casos, para mejorar la captura de sólidos. Los dos métodos más comunes para el acondicionamiento de lodos de aguas residuales son el acondicionamiento químico, ya sea mediante productos inorgánicos o polielectrolitos orgánicos, y el acondicionamiento térmico. La tabla 6.1 presenta los efectos que causan los métodos mencionados en una mezcla de lodos primarios y exceso de lodos activados.

En este capítulo se describe el acondicionamiento químico por medio de la aplicación de productos químicos inorgánicos y polielectrolitos orgánicos y, de manera breve, el proceso de elutriación o lavado de lodos porque puede reducir significativamente el consumo de productos químicos.

6. ACONDICIONAMIENTO PARA LA DESHIDRATACION

El acondicionamiento de lodos es un tratamiento físico o químico previo a su deshidratación que se lleva a cabo con el objeto de facilitar la eliminación de agua y, en la mayoría de los casos, para mejorar la captura de sólidos. Los dos métodos más comunes para el acondicionamiento de lodos de aguas residuales son el acondicionamiento químico, ya sea mediante productos inorgánicos o polielectrolitos orgánicos, y el acondicionamiento térmico. La tabla 6.1 presenta los efectos que causan los métodos mencionados en una mezcla de lodos primarios y exceso de lodos activados.

En este capítulo se describe el acondicionamiento químico por medio de la aplicación de productos químicos inorgánicos y polielectrolitos orgánicos y, de manera breve, el proceso de elutriación o lavado de lodos porque puede reducir significativamente el consumo de productos químicos.

TABLA 6.1 EFECTO DE DIFERENTES METODOS DE ACONDICIONAMIENTO SOBRE UNA MEZCLA DE LODOS PRIMARIOS Y EXCESO DE LODOS ACTIVADOS (WPCF, 1987).

	Sales inorgánicas	Polielectrolitos orgánicos	Acondicionamiento térmico
Mecanismo de acondicionamiento	coagulación y floculación	coagulación y floculación	alteración de las propiedades superficiales de células en la biomasa; hidrólisis; liberación de productos químicos
Efecto en la carga de sólidos	aumenta	aumenta	aumenta considerablemente
Efecto en el sobrenadante	mejora la captura de sólidos suspendidos	mejora la captura de sólidos suspendidos	aumentan considerablemente el color, concentración de sólidos, DBO soluble nitrógeno amoniacal y DQO
Requerimientos de operación	requiere poco personal	requiere poco personal	requiere personal capacitado y programas intensivos de mantenimiento preventivo.
Cantidad de sólidos en el lodo	aumenta considerablemente	prácticamente no se altera	generalmente se reduce

6.1 Factores que afectan el acondicionamiento

Cuando se analiza la deshidratación y acondicionamiento de lodos es importante considerar características referentes a las partículas sólidas en el lodo, tales como su tamaño, distribución, carga superficial e interacción entre ellas, pero también factores que influyen en la estructura del lodo como, la producción de biopolímeros, el grado de crecimiento de microorganismos en forma de filamentos, contenido de sólidos inorgánicos, etc. Cuando se trata de mezclas de lodos primarios, secundarios y/o químicos, debe considerarse también la diferente concentración de sólidos y grado de hidratación de cada uno, además de sus diferencias en cuanto a química superficial.

El tamaño de las partículas en el lodo es uno de los factores determinantes en el proceso de deshidratación. Cuando el tamaño promedio de partículas disminuye (generalmente por factores de operación, como un mezclado intenso), la relación entre superficie y volumen aumenta exponencialmente provocando mayor grado de hidratación, mayor resistencia a ser deshidratado y, por lo tanto, mayor demanda de productos químicos para su acondicionamiento (WPCF, 1987). La figura 6.1 presenta el intervalo de los tamaños relativos de partículas de algunos materiales comunes.

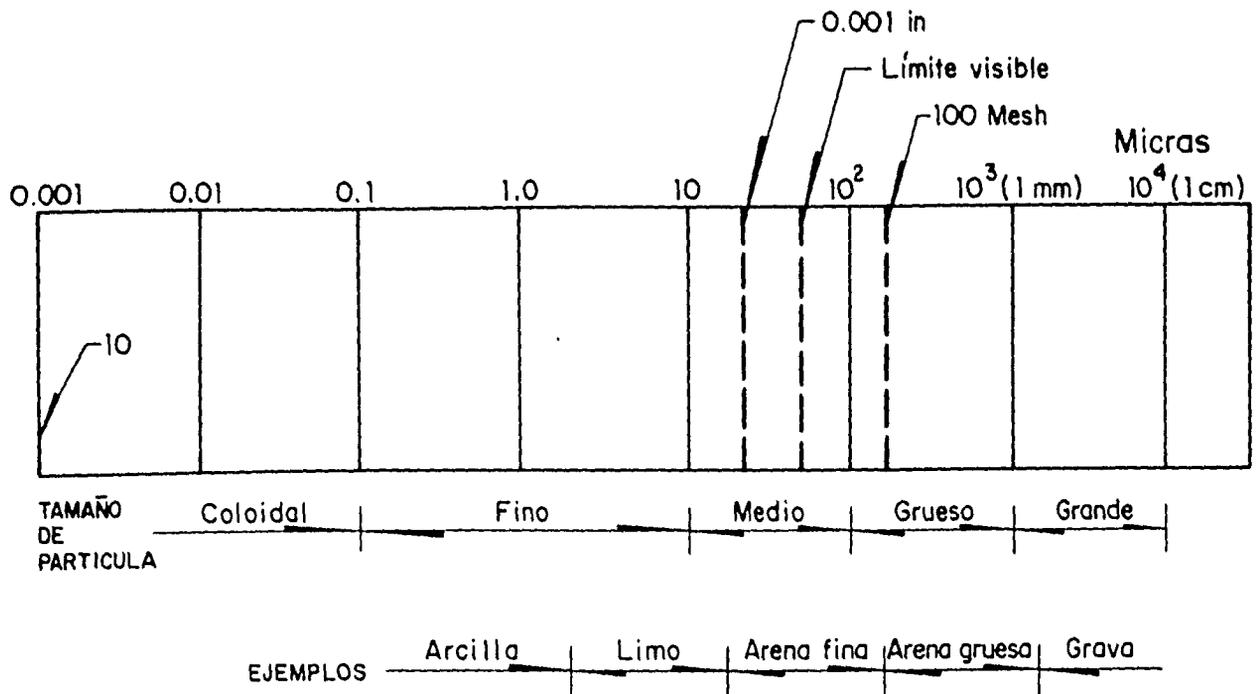


Fig. 6.1 Distribución de tamaño de partículas de algunos materiales

Los lodos de aguas residuales contienen mezclas de partículas sólidas de origen orgánico e inorgánico, cuyo tamaño puede variar ampliamente. Las aguas residuales municipales contienen cantidades considerables de partículas finas y coloidales que generalmente, debido a su tamaño (1 a 10 micras), no se sedimentan en los clarificadores primarios sin la aplicación de floculantes y coagulantes. Los procesos biológicos, además de reducir el contenido de materia

orgánica, remueven parte de este material coloidal, dando como resultado que los lodos secundarios, especialmente los generados en el sistema de lodos activados, son difíciles de deshidratar y, por lo tanto, requieren grandes cantidades de acondicionadores químicos.

Uno de los principales objetivos del acondicionamiento es incrementar el tamaño de las partículas finas mediante la formación de agregados. Las partículas en el lodo normalmente están cargadas negativamente y se repelen con facilidad, o bien están hidratadas y no pueden acercarse demasiado unas a otras. El acondicionamiento funciona neutralizando el efecto de la hidratación y de la repulsión electrostática, para inducir la aglomeración de estas partículas en agregados de mayor tamaño y densidad.

6.2 Acondicionamiento químico

El acondicionamiento químico normalmente se lleva a cabo con la aplicación de los productos químicos mediante el mezclado rápido seguido de un mezclado lento, durante los que se efectúa el proceso de coagulación-floculación.

En el tratamiento de aguas se reserva el término "coagulación" para denominar el fenómeno de desestabilización de las partículas suspendidas, es decir, a la eliminación de las fuerzas electrostáticas que las mantienen separadas, o que actúan sobre la parte hidrofílica de las partículas coloidales. Se efectúa normalmente con la adición de reactivos químicos llamados coagulantes, que logran su acción por medio de mecanismos de agregación o adsorción. Estos consisten en una serie de reacciones físicas y químicas entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma (Degremont, 1979).

El término de "floculación" se aplica al fenómeno en el cual las partículas ya desestabilizadas chocan unas con otras aglutinándose en pequeñas masas con peso específico superior al del agua, llamadas flóculos, cuyo tamaño es adecuado para su remoción efectiva por medio de sedimentación y/o filtración; sin embargo,

si los flóculos se someten a una agitación excesiva pueden llegar a separarse (Degremont, 1979). Por esto, es importante proporcionar únicamente la energía de mezclado suficiente para dispersar el acondicionador en el lodo y mantener juntas a las partículas y suspensiones coloidales.

Si las instalaciones para la deshidratación de lodos cuentan con varias unidades, es económico y recomendable diseñar un sistema de acondicionamiento individual para cada una de ellas, y de esta manera evitar problemas al equilibrar el caudal de varias corrientes (por ejemplo, cuando alguna unidad para o se pone en marcha). La localización del sistema de acondicionamiento debe optimizarse en relación con cada una de las unidades de deshidratación.

El acondicionamiento químico resulta económico por los mayores rendimientos y flexibilidad obtenidos. Se divide en dos grandes grupos que se describen en las secciones siguientes: la aplicación de sales inorgánicas, o bien de polielectrolitos orgánicos.

Entre las consideraciones importantes para seleccionar el agente químico más conveniente en cada caso, se encuentran las siguientes: el rendimiento del acondicionador, el manejo del material, requerimientos de almacenamiento, el sistema de deshidratación que será empleado y aspectos económicos. Generalmente, el rendimiento es el criterio de más importancia para efectuar dicha selección; éste puede determinarse con la ayuda de algunas pruebas de laboratorio como pruebas de jarras, tiempo de succión capilar, prueba Buchner para determinar la resistencia específica, etc. (WPCF, 1987). Rebhun *et al* (1989) informa que este último parámetro se puede utilizar con éxito para establecer la dosis óptima de acondicionador cuando en el proceso no se altere apreciablemente el contenido original de sólidos; en caso contrario, cuando se aplican sales inorgánicas por ejemplo, es más conveniente emplear el parámetro llamado rendimiento neto de sólidos, que es función de la resistencia específica y puede calcularse directamente de la prueba Buchner mediante la ecuación 6.1. En una gráfica de dosis contra rendimiento neto de sólidos, la dosis óptima será aquella que presente el rendimiento más alto.

$$Y = 2 Pw/urt \quad (6.1)$$

donde:

- Y rendimiento neto, en $\text{kg}/(\text{m}^3\text{h})$;
- P presión, en Nw/m^2 ;
- w masa de sólidos secos (depositados en la torta) por unidad de volumen de filtrado, en kg/m^3 ;
- u viscosidad del filtrado, en $(\text{Nw s})/\text{m}^2$;
- r resistencia específica, en m/kg ;
- t tiempo de filtración, en s

Al seleccionar el acondicionador apropiado, es importante considerar también la cantidad requerida del acondicionador químico y, por lo tanto, el peso y volumen adicional que debe ser manejado posteriormente. Normalmente, se requieren dosis mayores de sales inorgánicas que de polielectrolitos orgánicos; por ejemplo, la aplicación de cal y cloruro férrico puede aumentar el peso (y el volumen asociado) de la torta de lodo que requiere disposición final, entre un 20 y 50 % (WPCF, 1987).

6.2.1 Aplicación de sales inorgánicas

El acondicionamiento mediante sales inorgánicas se relaciona normalmente con la deshidratación mecánica, principalmente mediante filtros al vacío y filtros prensa. Las sales inorgánicas más empleadas como acondicionadores son la cal y el cloruro férrico; sin embargo, se llegan a utilizar también el cloruro ferroso, sulfato férrico, sulfato de aluminio y otros.

La acción coagulante de estas sales es el resultado de la hidrólisis que sigue a su disolución, sin llevar inmediatamente a la formación del hidróxido. Es recomendable que el pH se mantenga dentro de la zona correspondiente al mínimo de la solubilidad de los iones metálicos del coagulante utilizado (Degremont, 1979).

6.2.1.1 Cal

La cal se utiliza como acondicionador principalmente para elevar el pH, que baja como consecuencia de la aplicación de sales de hierro; sin embargo, proporciona otras ventajas como la reducción de olores desagradables y de los microorganismos patógenos (ver sección 5.3). Presenta también un ligero efecto deshidratante que elimina parte del agua libre en las partículas coloidales.

Otra ventaja es la formación de carbonato de calcio y algunos complejos de calcio que actúan como agentes de soporte, proporcionando mayor porosidad al lodo y aumentando su resistencia a la compresión, de manera que se facilita la salida de líquido (WPCF, 1987).

La cal es un producto químico fuertemente alcalino y cáustico que generalmente se presenta en polvo. Existe en dos formas comerciales: cal viva (CaO) y cal hidratada (Ca(OH)_2).

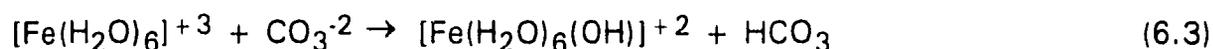
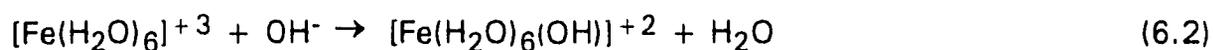
La cal viva se obtiene por medio de la calcinación de la piedra caliza (CaCO_3). Se hidrata fácilmente en una reacción exotérmica y, si se expone durante un tiempo prolongado al aire, reacciona con el dióxido de carbono formando carbonato de calcio que se deposita sobre las partículas de cal, disminuyendo su capacidad de acondicionamiento.

Generalmente, la cal viva se mezcla con agua antes de su aplicación para producir hidróxido de calcio o cal hidratada que es más reactiva y estable, y porque su manejo y mezclado con el lodo es relativamente simple. La mezcla es comúnmente llamada "lechada". Si el agua de mezclado presenta dureza elevada (alcalinidad mayor a 180 mg CaCO_3/l) es posible que se genere una excesiva incrustación de carbonatos en la tuberías, que puede causar problemas de obstrucción parcial en las líneas (WPCF, 1987).

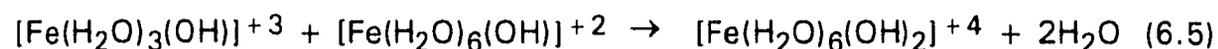
6.2.1.2 Sales de hierro

Las sales de hierro tienen ventaja sobre otras sales inorgánicas empleadas como coagulantes (como las sales de aluminio) porque forman un flóculo más pesado, con mayor velocidad de asentamiento, y porque pueden trabajar en un intervalo de pH más amplio.

El coagulante de hierro más empleado como acondicionador es el cloruro férrico, FeCl_3 . El Fe^{+3} en solución acuosa está hidrolizado $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+3}$ y al ser agregado al lodo reacciona primero con la alcalinidad OH^- , CO_3^{-2} , HCO_3^- y luego con la molécula de agua (Ham y Crespo, 1989). Las reacciones con la alcalinidad se ilustran en las ecuaciones siguientes:



El $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6(\text{OH})]^{+2}$ se hidroliza formando sucesivamente $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2]^+$ y $\text{Fe}(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})_3$. La reacción de estos productos entre sí crea productos poliméricos:



Esta reacción continúa hasta formar como producto final un hidróxido de hierro neutro $\text{Fe}(\text{OH})_3$ o negativo $\text{Fe}(\text{OH})_4^+$.

Las reacciones del $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+3}$ con la molécula de agua son del tipo ácido-base y pueden describirse mediante la ecuación 6.6.



Al igual que la reacción con la alcalinidad el $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6(\text{OH})]^{+2}$ se hidroliza hasta formar hidróxidos neutros o negativos y se polimeriza. Cuando no hay alcalinidad suficiente, el descenso del pH es más pronunciado debido a la formación de ácidos fuertes H_3O^+ (Ham y Crespo, 1989).

El hidróxido formado actúa como floculante y los complejos solubles cargados positivamente ayudan a neutralizar las cargas negativas de las partículas sólidas en el lodo, favoreciendo la formación de agregados. La composición de las diferentes especies de productos de hidrólisis, que existen en equilibrio con hidróxido de hierro recién precipitado, depende del pH. Por esto, el proceso de coagulación-floculación con FeCl_3 es sensible a variaciones de pH y, a valores menores que 6, la formación de flóculos es muy deficiente o no se lleva a cabo (WPCF, 1987). Normalmente se aplica en combinación con cierta dosis de cal como un medio eficiente para controlar el pH.

El cloruro férrico normalmente se aplica en solución, cuya concentración comercial varía entre 30 y 40%. Debido a que esta solución es muy corrosiva se recomienda utilizar materiales especiales en las instalaciones y equipo para su manejo, como PVC, cerámica, vinilo, algunas resinas epóxicas, etc. Debe evitarse que entre en contacto con la piel y ojos, por lo que es necesario que los operadores utilicen equipo de seguridad como guantes de goma, lentes de protección, caretas y delantales de hule.

6.2.1.3 Otros

El acondicionamiento mediante otras sales inorgánicas que actúan como coagulantes, como las sales de aluminio, es menos empleado pero también puede ser efectivo. Las más conocidas son el sulfato de aluminio, el sulfato de aluminio amoniacal y el aluminato de sodio. Estas sales forman flóculos ligeramente

pesados. Desde el punto de vista estequiométrico, y en su manejo y almacenamiento son similares a las sales de hierro.

En soluciones de sales de aluminio y un pH entre 6.0 y 7.4 se mantiene un mínimo de iones Al^{+3} en solución; sin embargo, fuera de este intervalo existe el riesgo de encontrar en solución una proporción considerable de aluminio libre. En ciertos casos, el lodo a tratar contiene gran cantidad de material rico en compuestos aluminicos; en ellos, una simple elevación del pH provoca la coagulación de dichos compuestos.

Los compuestos intermedios del aluminio, complejos hidróxido-aluminosos, aportan las cargas necesarias para la neutralización de las partículas de lodo y, según ciertos autores, también pueden polimerizarse y crear puentes entre las partículas coloidales minimizando el proceso de floculación (Degremont, 1979).

La aplicación de sales de aluminio no se recomienda cuando la deshidratación se lleva a cabo en lechos de secado, debido a que el agua no drena por gravedad con facilidad; sin embargo, si han sido aplicadas inicialmente para remover fósforo en el sedimentador primario el efecto puede ser contrarrestado mediante la aplicación de polielectrolitos orgánicos (EPA, 1987).

La aplicación de otros materiales inorgánicos, como cenizas de incinerador o carbón mineral, ha funcionado adecuadamente para mejorar la deshidratación. Por ejemplo, el carbón mineral se ha utilizado finamente pulverizado, logrando elevar la concentración de sólidos en la torta de lodo entre 7 y 14%, en dosis entre 0.1 y 0.3 kg de carbón/kg de sólidos secos en el lodo (EPA, 1987). La aplicación de cenizas contribuye a formar una estructura más porosa en la que drena el líquido con relativa facilidad, en algunos casos reduce la dosis requerida de otros acondicionadores (EPA, 1987).

Algunas veces también se utiliza como acondicionador la salmuera de hierro que se obtiene como subproducto en las operaciones de limpieza del acero, en la que el Fe^{+2} es oxidado a Fe^{+3} mediante la adición de cloruros o sulfatos. Su principal ventaja consiste en que es mucho más barata que el cloruro férrico (WPCF, 1987).

Una alternativa al empleo de cal para controlar el pH consiste en la aplicación de cenizas generadas como subproducto en hornos de industrias cementeras. Se requiere aproximadamente el doble de éste material para lograr el efecto causado por la cal, pero generalmente su costo es aproximadamente el 30% del costo de la cal viva (EPA, 1987).

6.2.1.4 Cloruro férrico y cal. Dosis típica

Normalmente, la combinación de cal y cloruro férrico como acondicionadores se asocia con los filtros al vacío y con los filtros prensa. En el primer caso, el acondicionamiento se lleva a cabo en un tanque localizado tan cerca como sea posible de la unidad de deshidratación, para reducir el deterioro de los flóculos durante su manejo y transportación. Generalmente los tanques de acondicionamiento están provistos de mezcladores de baja velocidad o velocidad variable y vertederos ajustables para el sobrenadante, para poder variar el tiempo de retención del lodo acondicionado (WPCF, 1987).

En el caso de los filtros prensa, la combinación de cal y cloruro férrico es muy efectiva porque soporta altas presiones sin la necesidad de algún precubrimiento. Generalmente la aplicación de los químicos, al igual que la deshidratación, se lleva a cabo intermitentemente ya sea en tanques o en la línea de alimentación de lodo mediante la inyección de los mismos (WPCF, 1987).

El cloruro férrico se aplica para neutralizar y formar flóculos de las partículas de lodo, generalmente cargadas negativamente. El fierro soluble reacciona con la alcalinidad disponible en forma de bicarbonatos para producir complejos de hidróxido férrico que actúan como floculantes. La disminución de alcalinidad causa una caída de pH, generalmente por debajo del pH óptimo para el proceso de floculación. El intervalo óptimo de pH para asegurar que la floculación con cloruro férrico se lleve a cabo y sea más eficiente se encuentra entre 6 y 7 ó sobre 8.5. Sin embargo, en la mayoría de los casos es necesario aplicar suficiente cal para elevar el pH por encima de 10.5 para con esto contribuir a formar una estructura en la que el líquido drene con mayor facilidad (WPCF, 1987).

La dosis típica de cloruro férrico como acondicionador de lodos varía entre 2 y 10 % en peso en base seca con respecto a la alimentación de lodo, independientemente de la aplicación de cal (WPCF, 1987). La EPA (1987) recomienda entre 20 y 62 g FeCl₃/kg de sólidos secos. Los valores más bajos corresponden a los lodos primarios crudos más frescos (con menor tiempo desde su producción); las dosis intermedias corresponden en promedio a los lodos digeridos por vía anaerobia; las dosis más altas corresponden a los lodos biológicos, especialmente los generados en el sistema de lodos activados, a los lodos digeridos por vía aerobia y algunos lodos químicos.

TABLA 6.2 DOSIS TÍPICAS PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE LODOS DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS CON CLORURO FERRICO Y CAL (EPA, 1979)

Tipo de lodo	Dosis, g de cal/kg de sólidos secos			
	Filtración al vacío		Filtros prensa	
	FeCl ₃	CaO	FeCl ₃	CaO
PRI crudos	20-40	80-100	40-60	110-280
LA crudos, (aire)	60-100	0-160	70-100	200-250
(PRI + FP) crudos	20-40	90-120		
(PRI + LA) crudos	25-60	90-360		
(PRI + LA + sépticos) crudos	25-40	120-150		
(PRI + LA + cal) crudos	15-25	ninguna		
Digeridos anaeróbicamente y elutriados				
PRI	25-40	0-50		
PRI + LA (aire)	30-60	0-75		
Digeridos anaeróbicamente				
PRI	30-50	100-130		
PRI + FP	40-60	125-175		
PRI + LA (aire)	30-60	150-210	40-200	110-300

PRI Lodos primarios; LA exceso de lodos activados; FP lodos de filtro percolador

La dosis típica de cal, como CaO, varía entre 0 y 40% en peso en base seca (WPCF, 1987); esto, generalmente corresponde a valores entre 0 y 277 g/kg de sólidos secos en la alimentación de lodo (EPA, 1987). Normalmente, los lodos estabilizados mediante digestión anaerobia pueden ser deshidratados fácilmente sin la aplicación de cal, mientras que los lodos del sistema de lodos activados requieren las dosis de cal más altas. Los lodos primarios requieren dosis más bajas que las requeridas por lodos activados o por los digeridos aeróbicamente. Los lodos

químicos generados por la remoción de fosfatos generalmente requieren cierta dosis adicional de cal.

La tabla 6.2 presenta dosis típicas de estos dos compuestos para diferentes tipos de lodos, que serán deshidratados en filtros al vacío o en filtros prensa.

Es importante considerar que el acondicionamiento con estas sales incrementa la masa total de lodo que requiere disposición final. En promedio, se produce un kilogramo adicional de lodo por kilogramo de cal y cloruro férrico aplicado (EPA, 1987). Esto además de aumentar la cantidad final total de lodo, disminuye su valor energético en caso de que se incinere. Sin embargo, la utilización de cal causa efectos benéficos por sus propiedades para la estabilización de residuos.

6.2.1.5 Manejo y almacenamiento

Las instalaciones para el manejo de los acondicionadores deben proporcionar seguridad y facilidad de operación y servicio. Los tanques deben situarse cerca de las unidades de deshidratación, siempre y cuando se asegure un fácil acceso a los controles y el equipo en general para las operaciones y ajustes de rutina, limpieza o mantenimiento.

Los sistemas para el manejo de cal pueden dividirse en tres subsistemas: almacenamiento de la cal seca; alimentación, preparación (hidratación) y remoción de arena; almacenamiento y transporte de la lechada.

El tanque de almacenamiento para la cal seca debe tener capacidad suficiente para contener cuando menos la descarga de un camión y compensar usos erráticos. Se recomienda almacenar en promedio los requerimientos de 14 a 30 días, de manera que se tenga un margen del producto y se mantenga en buenas condiciones. Tanto por razones económicas como de operación se prefieren los tanques cilíndricos, con una proporción entre la altura y diámetro de 2.5:1 a 4:1. Cuando existen limitaciones de espacio o altura, el diseño del tanque está controlado normalmente por factores como la inclinación de la tolva de descarga en el fondo del tanque,

que generalmente se diseña con una pendiente mínima de 60° con respecto a la horizontal para cal viva y de 80° para cal hidratada (WPCF, 1987).

Cuando se maneja cal viva es importante considerar que se hidrata y pulveriza con facilidad por lo que debe minimizarse su movimiento y agitación innecesarios. Esto sugiere una configuración que permita su flujo por gravedad, especialmente cuando se requiere un caudal continuo de cal. Los alimentadores del tanque de hidratación pueden ser bandas gravimétricas o tornillos volumétricos que reciben la cal por gravedad, desde el tanque de almacenamiento.

En el sistema de hidratación el mezclado es un factor determinante para que la lechada sea homogénea y tenga la consistencia adecuada. Debe proporcionar un contacto uniforme entre las partículas de cal y el agua para prevenir que se localicen zonas con elevada temperatura que puedan provocar accidentes por saltos violentos de líquido hacia afuera del sistema. La velocidad de mezclado debe ser tan lenta como sea posible, considerando que proporcione contacto suficiente entre las partículas de cal y el agua, para minimizar la corrosión del equipo.

Una vez que se ha efectuado la hidratación de la cal, es importante separar y remover, de la lechada, los sólidos inertes y la arena para evitar que se mezclen con el lodo. Es necesario también permitir que la lechada se "estabilice", es decir que permanezca durante un mínimo de 2 horas en tanques de retención antes de ser mezclada con el lodo. Algunas veces se requiere almacenar la mezcla durante más tiempo para compensar períodos durante los que no se lleve a cabo el proceso de hidratación. El tamaño de estos tanque de almacenamiento depende del tiempo de retención necesario y de la concentración de la lechada; la forma y tamaño de los mismos puede adecuarse a las posibilidades de espacio, siempre y cuando no se dificulte el acceso para su limpieza. Algunas veces se recomienda que los tanques cuenten con un sistema de mezclado para mantener hidratadas a las partículas de cal.

Después de dar tiempo suficiente para que se estabilice la cal hidratada, se envía al tanque de acondicionamiento para su mezclado con el lodo, normalmente mediante bombas centrífugas o bombas de cavidad progresiva (WPCF, 1987).

Los tanques para el almacenamiento de la solución de cloruro férrico, así como el equipo e instalaciones para su transporte, son normalmente de PVC, fibra de vidrio, cerámica, algunas resinas epóxicas u otros materiales resistentes a la corrosión. Los tanques normalmente se construyen con una especie de diques alrededor para prevenir posibles derrames.

La capacidad de los tanques de almacenamiento depende del consumo. Generalmente, al igual que en el caso de la cal, se recomienda una capacidad aproximada para cubrir los requerimiento de entre 14 y 30 días de operación; sin embargo, el FeCl_3 puede almacenarse en buenas condiciones durante largos períodos de tiempo, usualmente a granel, en tanques de plástico resistente o fibra de vidrio (WPCF, 1987).

En instalaciones pequeñas la solución de FeCl_3 se envía directamente desde su almacenamiento hasta el punto o puntos de aplicación en el tanque de mezclado con el lodo, normalmente mediante bombas "medidoras" para controlar su alimentación; se recomienda que las paredes internas de las bombas tengan un recubrimiento resistente a la corrosión. En algunas instalaciones de mayor tamaño se utilizan tanques intermedios con menor capacidad que el almacenamiento, para contener temporalmente el consumo diario del producto químico y de ahí alimentarlo al tanque de acondicionamiento.

Para llevar a cabo el acondicionamiento, se aplica primero el cloruro férrico y posteriormente la cal hidratada. Para que la floculación se lleve a cabo es necesario que las partículas estén muy cerca unas de otras, para lo que generalmente se lleva a cabo inicialmente un mezclado rápido para provocar que las partículas choquen entre sí y facilitar la formación de flóculos.

6.2.1.6 Control del proceso

Para un apropiado control del proceso y de la dosis acondicionador, es necesario tomar muestras de los acondicionadores, alimentación de lodo, de la torta descargada en la unidad de deshidratación y del filtrado. Para asegurar la adecuada

operación del sistema es conveniente determinar el caudal promedio, la tasa de alimentación de lodo, la concentración de sólidos promedio en la torta de lodo, en la alimentación y en el filtrado, la captura de sólidos, la tasa de alimentación y la concentración de los agentes químicos.

En general, se recomienda la evaluación mensual del rendimiento del proceso mediante el análisis de las variaciones diarias con los parámetros siguientes:

- Tasa de alimentación de lodo, kg/d (se requiere el caudal y la concentración de sólidos suspendidos totales);
- tasa de alimentación de FeCl_3 , kg/d (se requiere el caudal de la solución de FeCl_3 y su concentración porcentual);
- tasa de alimentación de CaO o Ca(OH)_2 , kg/d (se requiere el caudal de la lechada de Ca(OH)_2 y su concentración porcentual), y
- eficiencia en la captura de sólidos (se requiere la concentración de sólidos en la torta de lodo, en la alimentación y la concentración de sólidos suspendidos totales en el filtrado).

La demanda de productos químicos en función de la tasa de alimentación de lodo debe calcularse diariamente y compararse con las tendencias anteriores. Si hay variaciones considerables, pueden indicar la necesidad de llevar a cabo algunos cambios en el proceso o la necesidad de limpiar o de darle mantenimiento a la unidad de deshidratación. Los cálculos de la recuperación de sólidos pueden realizarse mediante la ecuación 6.7 si se considera que todo el lodo que se alimenta (sólidos y líquido) sale del sistema en la torta de lodo o en el filtrado.

$$C = \{1 - [C_f (C_t - C_a) / C_a (C_t - C_f)]\} 100$$
$$= [C_t (C_a - C_f)] / [C_a (C_t - C_f)]$$

donde:

- C Captura de sólidos, %
- C_f concentración de sólidos en el filtrado, mg/l
- C_a concentración de sólidos en la alimentación de lodo, mg/l
- C_t concentración de sólidos en la torta de lodo, mg/l

Si se considera un factor de corrección por el agua de lavado de bajas concentraciones de sólidos se debe utilizar la ecuación siguiente:

$$C = \frac{C_t (C_a - \alpha C_f)}{C_a (C_t - C_f)} \quad (6.8)$$

donde:

$$\alpha = 1 - Q_r/Q_a$$

Q_r caudal del agua residual, l/s

Q_a caudal de la alimentación de lodo, l/s

La captura de sólidos es un parámetro muy importante, y debe asegurarse que sea mayor al 85 %, para evitar que elevadas concentraciones de sólidos finos suspendidos regresen a la sección de tratamiento de líquido y causen una sobrecarga de sólidos (WPCF, 1987).

6.2.2 Aplicación de polielectrolitos orgánicos

Los polielectrolitos son compuestos orgánicos muy variados en su estructura química, como los derivados del almidón y la celulosa, materiales proteicos y muchos otros que se producen en forma sintética, que recientemente han tenido gran desarrollo para aplicaciones en el tratamiento de aguas y de lodos de aguas residuales. Actualmente existe una gran variedad de polielectrolitos comerciales (con diversa composición química, efectividad funcional y costo) que se utilizan ampliamente como acondicionadores para la deshidratación.

Su aplicación en plantas para tratamiento de aguas residuales municipales comenzó durante la década de los sesenta y desde entonces su empleo se ha difundido rápidamente (WPCF, 1987). La aparición de equipo de deshidratación más sofisticado y la importancia de reducir los costos de la disposición final de los lodos han contribuido a que su utilización sea cada vez más atractiva. Originalmente, fueron aplicados para acondicionar lodos primarios o mezclas de lodos primarios y biológicos que presentaran características para una fácil deshidratación por medio de filtros rotatorios al vacío o centrífugos. El desarrollo de la efectividad de los

polielectrolitos ha permitido que su empleo aumente considerablemente con todos los tipos de procesos para la deshidratación de lodos (EPA, 1979). Dependiendo de su aplicación, los polielectrolitos pueden mejorar el rendimiento de la unidad, la captura de sólidos, el espesamiento o deshidratación de lodos, o combinaciones de estos factores.

6.2.2.1 Propiedades químicas y físicas de los polielectrolitos

Químicamente, los polielectrolitos son polímeros de alto peso molecular (10^4 - 10^7), solubles en agua, con un gran número de sitios activos cargados en sus largas cadenas orgánicas, que pueden ser lineales o ramificados, compuestos de un solo tipo de monómero o de varios tipos; pero en todos los casos, forman macromoléculas de tamaño coloidal. Un monómero es la subunidad a partir de la cual se forman los polímeros mediante diversos tipos de reacciones de polimerización. El monómero más empleado para la fabricación de polímeros orgánicos sintéticos es la acrilamida (EPA, 1987).

Los polielectrolitos se clasifican de acuerdo con el tipo de carga eléctrica, especies químicas involucradas, peso molecular, densidad de carga y sólidos activos.

En cuanto a su carga, los polielectrolitos pueden ser aniónicos o catiónicos, si los grupos ionizables son negativos o positivos respectivamente, o no iónicos si no presentan carga eléctrica predominante.

La densidad de carga es una medida de la cantidad de sitios en la cadena de un polímero que tienen la carga asociada con éste. En un polímero catiónico, todos los sitios cargados positivamente serán considerados para determinar la densidad de carga, que normalmente se expresa con un porcentaje de los sitios disponibles. Los valores de parámetro pueden estar en un nivel bajo (entre 10 y 15%) o en un nivel alto (entre 10 y 100%) (WPCF, 1987).

La cantidad de sólidos activos se refiere al volumen real de la cadena en el polímero. Usualmente se expresa como un porcentaje del volumen total;

dependiendo del tipo de polímero, la cantidad de sólidos activos puede tomar valores desde 2 hasta 95%.

En general, los polielectrolitos están disponibles en polvo, soluciones acuosas o en emulsiones aceite-agua. Usualmente la vida media de los polvos es de uno o varios años, mientras que la de la mayoría de las presentaciones líquidas fluctúa entre 6 y 12 meses y son sensibles a cambios bruscos de temperatura durante su almacenamiento (EPA, 1987).

La capacidad de un polielectrolito para actuar como floculante depende de su afinidad para enlazarse a la superficie de las partículas coloidales. Los enlaces se pueden formar entre grupos funcionales particulares del polímero y lugares específicos de la superficie coloidal. Los polielectrolitos interactúan con las partículas de lodo en tres formas: mediante fuerzas electrostáticas, mediante fuerzas de Van der Waals y mediante la formación de enlaces de hidrógeno. Las fuerzas de Van der Waals son en este caso atracciones débiles causadas por la polarización en las moléculas individuales. Los enlaces o puentes de hidrógeno se llevan a cabo debido a la atracción de moléculas altamente polares; son característicos entre ácidos medianamente fuertes y grupos cargados negativamente.

La efectividad de un floculante polimérico está determinada por factores que pueden agruparse en tres categorías: variables del sistema, parámetros relacionados con el polímero y factores operacionales. Las variables del sistema incluyen la carga y tamaño de las partículas, la concentración y composición de sólidos, etc. Los parámetros relacionados con el polímero incluyen la química del floculante y sus características estructurales. Entre los factores operacionales se encuentran las condiciones de operación requeridas por el lodo y la aplicación del polímero al sistema.

El acondicionamiento se lleva a cabo por el mecanismo de coagulación-floculación explicado en la sección 6.2 e ilustrado en la figura 6.2. Generalmente se utilizan polielectrolitos catiónicos debido a que la mayoría de las partículas en lodos residuales de origen doméstico están cargadas negativamente.

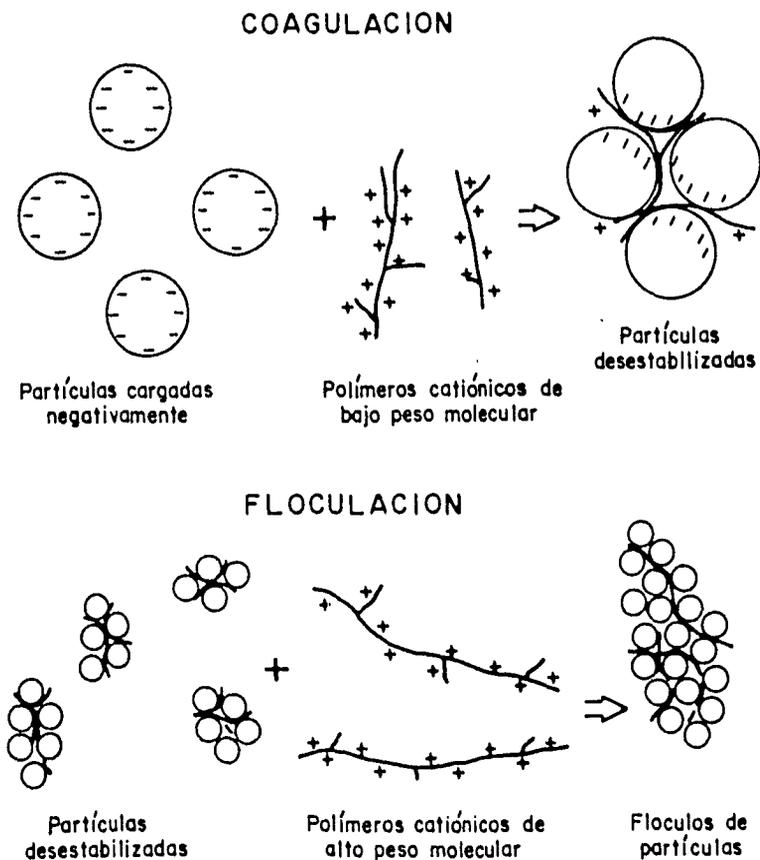


Fig. 6.2 Proceso de coagulación y floculación mediante polielectrolitos orgánicos.

Los polielectrolitos catiónicos se obtienen principalmente incorporando grupos amino y aminas cuaternarias en la molécula del polímero. Los homopolímeros más comunes parecen ser el cloruro de poli-dimetil-dialilamonio y las poliaminas condensadas, cuyo peso molecular puede aumentarse si se copolimerizan con acrilamida a expensas de la densidad de carga (se prefiere que los polielectrolitos catiónicos tengan un peso molecular promedio de al menos 10,000). Las poliácridamidas aminometiladas y los copolímeros catiónicos aminometilados son muy efectivos en el tratamiento de lodos de aguas residuales municipales (Ham y Crespo, 1989). Estos productos están disponibles únicamente en forma líquida.

6.2.2.2 Estructura en solución

Los polímeros orgánicos se disuelven en agua para formar soluciones de muy diversa viscosidad. La viscosidad resultante depende del peso molecular del polímero, de la densidad de carga iónica y del contenido de sales de la solución. A concentraciones normales, la cadena principal de los polímeros adopta la forma de un filamento enrollado de forma aleatoria como se presenta en la figura 6.3. Sin embargo, esta figura no ilustra la gran longitud de la cadena, ni el alto número de cadenas poliméricas activas presentes en la solución. Se estima que una dosis de 0.2 mg/l de polielectrolito, cuyo peso molecular promedio se encuentra alrededor de 100 000, proporciona aproximadamente 120 trillones de cadenas activas por litro de agua tratada (EPA, 1987).

A dilución infinita la cadena principal tiende a desenrollarse por efecto de las fuerzas de repulsión causadas por cargas adyacentes del mismo signo a lo largo de la misma cadena.

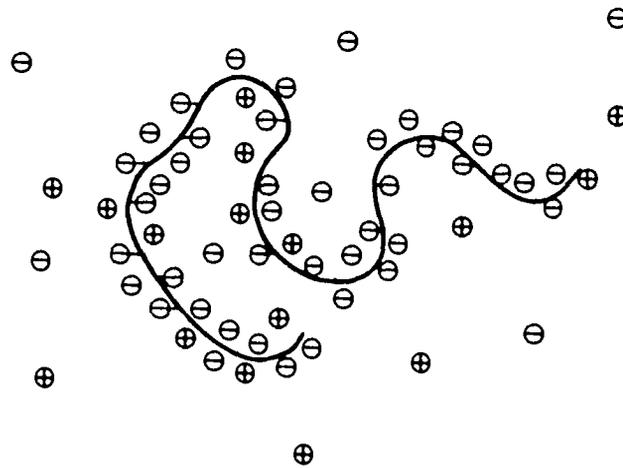
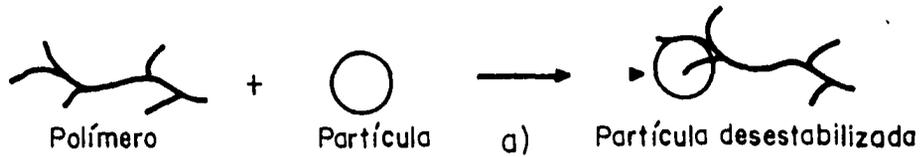


Fig. 6.3 Estructura típica de un polielectrolito catiónico en solución (EPA, 1987).

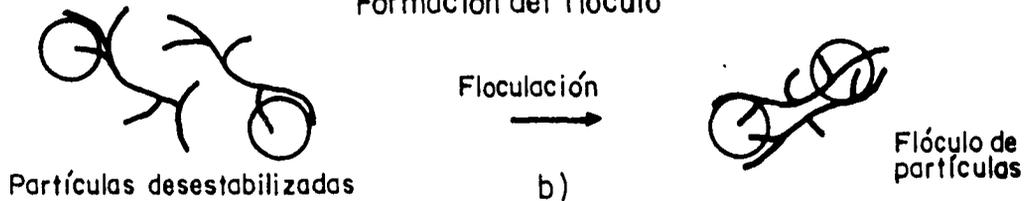
Las soluciones de polielectrolitos facilitan la deshidratación de lodos, debido a que causan los siguientes fenómenos:

- Desorción entre las partículas de lodo y la superficie del agua;

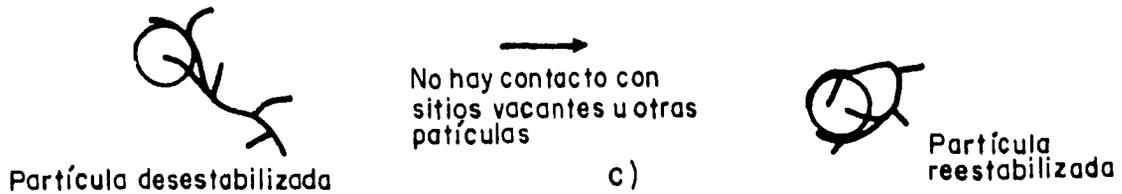
Adsorción Inicial a dosis óptima de polímero



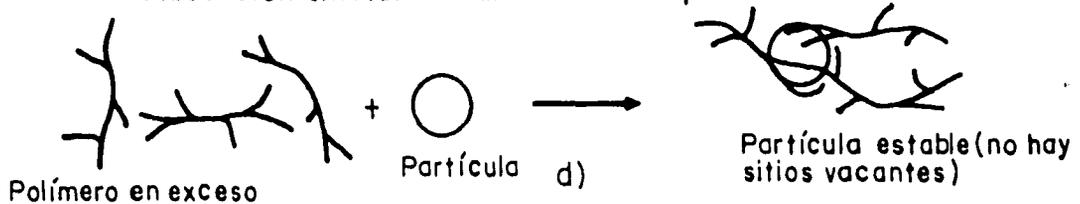
Formación del flóculo



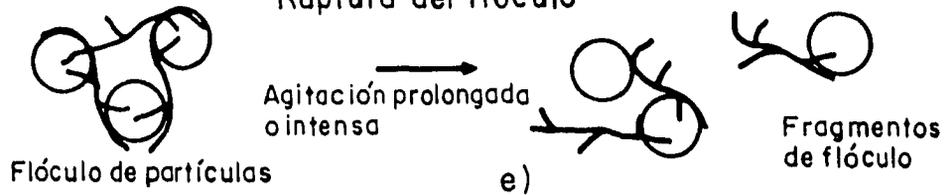
Adsorción secundaria del polímero



Adsorción Inicial con un exceso de polímero



Ruptura del flóculo



Adsorción secundaria de polímero

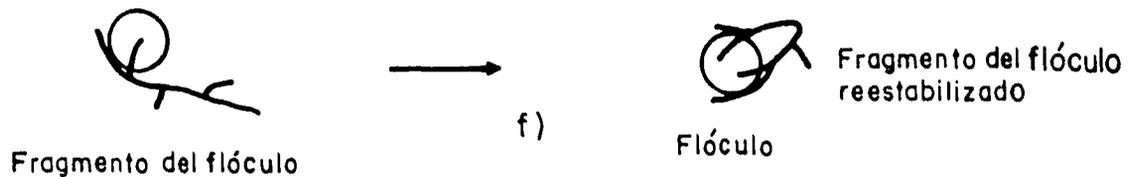


Fig. 6.4 Desestabilización de partículas coloidales por medio de polímeros (EPA, 1987).

- neutralización de las cargas, generalmente negativas, en las partículas de lodo;
- aglomeración de pequeñas partículas mediante enlaces y fuerzas de atracción entre ellas (ver sección 6.2.2.1).

El resultado es la formación de una torta de lodo relativamente permeable que libera el agua con mayor facilidad. La figura 6.4 ilustra el mecanismo de acción de los polielectrolitos en solución bajo condiciones normales de operación (figs. 6.4(a) y 6.4(b)) y bajo condiciones de sobredosis o mezclado excesivo de los flóculos (figs. 6.4(c) a 6.4(f)). Los problemas representados en las figuras 6.4(c) y 6.4(f) raramente ocurren en procesos bien diseñados.

6.2.2.3 Presentación

Los polímeros se fabrican en diferentes formas, las más conocidas son los polímeros secos, soluciones y emulsiones, aunque también pueden fabricarse como gel.

Los polímeros secos se producen en polvo, hojuelas o gránulos. Generalmente son de color blanco y tienen un alto contenido de sólidos activo. Este fluctúa entre 90 y 95% dependiendo del fabricante, mientras que la fracción restante está compuesta de agua y/o sólidos inertes. Deben almacenarse en áreas frescas y libres de humedad ya que si entran en contacto con ella es común que el polímero forme una especie de torta y quede inservible (WPCF, 1987).

Los polímeros en emulsión son líquidos de apariencia lechosa en los que sus partículas están dispersas en un hidrocarburo. Debido a la tecnología empleada en su fabricación es posible producir emulsiones poliméricas con altos pesos moleculares y altos porcentajes de sólidos activos (entre 25 y 50% sin producir viscosidades indeseables) (WPCF, 1987). La viscosidad aparente de emulsiones limpias varía entre 300 y 5000 cps, viscosidad medianamente alta comparada con la viscosidad aparente del agua a 20°C (1 cps) y de la melaza (24, 000 cps). Debe

tenerse cuidado de no mezclar agua con una emulsión limpia porque pueden formarse coágulos; emulsión limpia se refiere a cualquier polímero que se mantenga homogéneo, nítido y en buenas condiciones.

Existe un tipo de polímeros líquidos obtenido específicamente mediante reacciones de condensación de una amina primaria o secundaria con formaldehído y una cetona para formar una beta aminocetona (EPA, 1987). Son líquidos con muy altos pesos moleculares (entre 2 y 4 millones) y muy altas viscosidades, debido a esto, generalmente presentan bajos porcentajes de sólidos activos (entre 2 y 10%). La viscosidad que corresponde a los pesos moleculares más altos varía entre 45,000 y 60,000 cps. Generalmente, la solución presenta un pH mayor a 12, que puede causar la formación de escamas o incrustaciones en la tubería de alimentación del polímero o en el equipo de deshidratación (WPCF, 1987).

Otras soluciones de polímeros cubren un amplio intervalo de viscosidades dependiendo del producto químico empleado, pueden ser incoloras o coloridas, desde un tono ligeramente azulado hasta color ámbar. Se caracterizan porque generalmente se obtienen polímeros de bajo a medio peso molecular y su porcentaje de sólidos activos puede ser menor a 10% o hasta 50%. El pH de la solución se mantiene neutro o ligeramente ácido por lo que la formación de escamas en las líneas de alimentación no representa problemas significativos. La mayoría de los polímeros líquidos tienen promedios de vida mayores a un año; sin embargo, se recomienda no almacenarlos durante más de 90 días (WPCF, 1987).

6.2.2.4 Dosis típicas

Actualmente existe una amplia gama de polielectrolitos con diferentes propiedades y características, de manera que pueden aplicarse como acondicionamiento para prácticamente cualquier método de deshidratación; sin embargo, generalmente se asocian a filtros banda. La tabla 6.3 presenta datos y dosis típicas de polielectrolitos a diversos tipos de lodos en algunas plantas para tratamiento de aguas residuales de origen doméstico. A continuación se proporciona información

con respecto a este tipo de acondicionamiento en relación con los filtros banda, filtros prensa y lechos de secado, sistemas que se proponen en este trabajo.

TABLA 6.3 DESEMPEÑO DEL PROCESO DE DESHIDRATACION CON LA APLICACION DE POLIMEROS ORGANICOS (WPCF, 1987).

Sistema	Tipo de lodo	Concentración de sólidos, %		Captura de sólidos, %	Tipo de Polímero ^a	Dosis, g/kg SS*
		Alimentación	torta			
Filtro banda	PRI + LA	4.4	22	92	polvo	10.5
Filtro banda	PRI	4.0	30	88	polvo	2.5 - 3.0
Filtro banda	PRI + LA	3.8	17 - 25	90	solución	55.5
Filtro banda	PRI + LA	4.0	22 - 25	>90	solución	65.0
Filtro banda	PRI + LA ^b	4.5	22 - 25	>90	solución (copolímero)	65 - 75
Filtro banda	PRI + LA	4.5 - 5.0	35 - 40	90 - 95	emulsión	20 - 25
Centrífuga	RTT ^c	2.0 - 3.0	16 - 18	99	polvo aniónico	12.5 - 15
Centrífuga	-	2.0 - 3.0	13 - 15	90	solución	95.0
Centrífuga	PRI ^b	15.9	39	97	emulsión	3.5
Filtro al vacío	PRI + LA	4.0	19.5	95	solución	30 - 40
Filtro al vacío	PRI + LA ^b	4.5	19.5	95	solución (copolímero)	40 - 60
Filtro al vacío	PRI + LA	3.5	13 - 16	75 - 80	solución	55 - 70
Filtro prensa	PRI + LA	3.0	20	(50 mg/l de sólidos prensados)	solución	50 - 52.5
Lechos de secado (asistidos con vacío)	PRI + LA	2.0 - 2.5	14 - 20	11 - 24	emulsión	12.5
Filtro banda	-	3.2	16.8	96.4	catiónico/ aniónico (ambos en polvo)	5.7 2.6
Filtro al vacío	DA	6.0 - 12.0	34 - 35	-	solución/ poliamina	8.5 - 11.5 5.5 - 11.5
Centrífuga	LA ^c	1.8	14 - 15	90	catiónico/ aniónico (ambos en polvo)	6.0 3.0

NOTAS:

PRI Lodos primarios; LA exceso de lodos activados; DA digeridos por vía anaerobia; RTT residuos de tratamiento terciario

* g de acondicionador/kg de sólidos secos

^a polímeros catiónicos, excepto donde se indica

^b con bajo contenido de cal

^c con alto contenido de cal

Filtros banda

La experiencia en la deshidratación con filtros banda indica que el acondicionamiento con polielectrolitos orgánicos es el más conveniente, y necesario para que el filtro opere adecuadamente; sin embargo, en comparación con otros sistemas mecánicos, los filtros banda presentan la mayor necesidad de optimizar la dosis del polímero en función de las características del lodo que se alimenta al sistema (EPA, 1987).

TABLA 6.4 DOSIS TÍPICAS DE POLIELECTROLITOS SECOS PARA FILTROS BANDA (Adaptada de EPA, 1987).

Tipo de lodo	Dosis, g polímero/kg SS	
	Intervalo	Valor típico
Lodo crudo:		
PRI	1.0 - 4.5	2.5
PRI + FP	1.5 - 7.5	5.0
PRI + LA	1.0 - 10.0	3.5
LA	1.0 - 10.0	5.0
Digeridos		
por vía aerobia:		
PRI + LA	2.0 - 7.5	5.0
Digeridos		
por vía anaerobia:		
PRI	1.0 - 5.0	1.5
PRI + LA	1.5 - 7.5	3.0

NOTAS:

PRI lodos primarios; LA exceso de lodos activados; FP lodos obtenido en filtro percolador.
SS sólidos secos

Si se aplica una dosis por debajo de la dosis óptima, provocará una deshidratación inadecuada en la zona de drenado por gravedad del filtro, causando una sobrecarga de lodo en esta zona, o extrusión del lodo en la zona de presión. Si se trata de lodos biológicos, la falta de acondicionador puede causar que los sólidos del lodo tapen el medio filtrante. Por otro lado, el sobrecondicionamiento también puede causar que se tape el medio filtrante y problemas para descargar la torta, debido a que el lodo se torna pegajoso y/o muy viscoso. Además, el lodo sobrefloculado puede drenar tan rápido que los sólidos no se distribuyen de forma homogénea

sobre la banda, de manera que se produce una torta de lodo de baja calidad (EPA, 1987).

La mayor influencia en los requerimientos acondicionador se atribuye al porcentaje de sólidos biológicos presentes en el lodo (EPA, 1979).

La tabla 6.4 presenta datos de las dosis típicas de polielectrolitos catiónicos secos para el acondicionamiento de lodos deshidratados en filtros banda.

Filtros prensa

Aunque el acondicionamiento típico cuando se deshidrata en filtros prensa se lleva a cabo mediante la aplicación de una combinación de cal y cloruro férrico, muchas plantas para tratamiento de aguas residuales han sustituido con éxito el empleo de sales inorgánicas por el de nuevos polímeros orgánicos, tanto en sistemas de baja presión como de alta presión (WPCF, 1987). Entre las ventajas que se obtienen se encuentran el manejo de menos material, menores costos y que no se incrementa la masa total que requiere disposición final. Las dosis empleadas son similares a las requeridas cuando se deshidrata en filtros banda (Eden, 1983).

Lechos de secado

La aplicación de polímeros orgánicos es la alternativa de acondicionamiento más aceptable cuando el lodo se deshidrata en lechos de secado, obteniéndose generalmente buenos resultados al aplicar dosis entre 0.25 y 1.0 g/kg de sólidos secos en el lodo. Se recomienda que el polímero y la dosis apropiados se seleccionen de acuerdo con resultados de pruebas a nivel laboratorio con el lodo en cuestión (EPA, 1987).

Los polímeros se aplican principalmente en lodos en los que el agua drena deficientemente y lodos con altas concentraciones de partículas finas suspendidas que pueden penetrar a través del lecho y obstruirlo. En lechos de secado, los polímeros aceleran la velocidad de drenado por gravedad, pero no afectan la velocidad de evaporación del agua.

6.2.2.5 Aplicación

La aplicación de polielectrolitos orgánicos puede mejorar tanto el espesamiento como la deshidratación de lodos, y depende en fundamentalmente del sistema utilizado.

En el caso de filtros banda, su efectividad depende del rendimiento del polímero utilizado. Una vez seleccionado el polímero adecuado, los factores más importantes son la cantidad e intensidad de mezclado entre el acondicionador y el lodo. Se recomienda incluir en el diseño del tanque de acondicionamiento varios puntos para la aplicación del polímero y la alimentación del lodo, que debe efectuarse a intervalos regulares. El empleo un sistema de mezclado de velocidad variable, puede minimizar la necesidad de varios puntos de aplicación. Para obtener el mejor funcionamiento del filtro es muy importante proporcionar flexibilidad al sistema de acondicionamiento, especialmente si se esperan variaciones importantes en las características del lodo o diferentes tipos de lodo (WPCF, 1987).

Por otro lado, cuando se deshidrata en filtros prensa, el punto de aplicación del polímero es un factor crítico. En la mayoría de los casos, no es posible aplicar el polímero en el lado de descarga de la bomba de alimentación de lodo, debido a la alta presión en la línea. Normalmente, el punto de aplicación más efectivo es en el lado de la succión de la bomba, considerando que si se aplica más atrás en la línea del lodo, el proceso no es efectivo debido a que con frecuencia causa demasiado esfuerzo en la línea (WPCF, 1987).

Cuando la deshidratación se efectúa en lechos de secado, el acondicionamiento mediante polímeros permite que la capa de lodo aplicada sea más profunda, y

acelera el drenado del agua. El punto de aplicación del polímero deberá determinarse en cada planta debido a que la tasa de alimentación de lodo puede variar durante el llenado del lecho. El sistema debe diseñarse de manera que se permita al operador ajustar la dosis de polímero conforme se alimenta el lodo y verificar visualmente los flóculos en el lodo que entra al lecho o llevar a cabo determinaciones rápidas del drenado del agua a intervalos regulares durante la operación de llenado.

6.2.2.6 Equipo de alimentación

Los polímeros en solución se aplican directamente al lodo mediante sistemas que incluyen tanques de alimentación mezclados, normalmente mediante mezcladores estáticos; sin embargo, los polímeros secos o en emulsión requieren un pretratamiento antes de ser mezclados con el lodo.

Los polímeros secos se mezclan con agua; al preparar las soluciones de polímeros secos se lleva a cabo un primer paso de "pre-mojado", mediante un eyector que permite humedecer las partículas antes de entrar al tanque de mezclado. Este paso es determinante para obtener las soluciones de manera adecuada. El polímero puede alimentarse al eyector mediante un embudo o tolva o ajustando una manguera de plástico en la succión del eyector y succionar el polímero desde su almacenamiento.

Una vez que se lleva a cabo este primer paso, el polímero se descarga al tanque de mezclado, donde la solución se agita mediante un mezclador de baja velocidad (400 a 500 rpm) durante el tiempo de retención necesario (éste se asegura al incorporar al sistema un tanque de alimentación) para después enviarla al punto de alimentación (WPCF, 1987).

Las emulsiones requieren también un proceso inicial que las desestabiliza por mezclado, que puede llevarse a cabo mediante mezcladores de alta velocidad, mezcladores estáticos o un dispersor para líquidos. Este último es muy similar al eyector utilizado para polímeros secos y pone la emulsión en contacto con agua a

alta presión. El máximo rendimiento del polímero se asegura proporcionando tiempo de retención el suficiente (WPCF, 1987).

6.2.3 Mezclado

En el acondicionamiento químico el mezclado del reactivo y el lodo es un factor determinante para el éxito del proceso. Si se aplica un mezclado excesivo, los flóculos formados por la reacción entre las partículas de lodo y el acondicionador pueden ser dañados o deteriorados considerablemente, de manera que el efecto esperado se revierte parcialmente (Eden, 1983). Para optimizar el proceso es necesario asegurarse de que el acondicionador sea mezclado de manera efectiva, sin producir un esfuerzo cortante excesivo en los flóculos formados. Otras posibles fuentes de esfuerzo excesivo son los cambios bruscos en la dirección de la tubería, o las bombas defectuosas que deben reemplazarse rápidamente.

Cuando se emplean sales inorgánicas es usual que los tanques de acondicionamiento estén equipados con agitadores mecánicos para asegurar el contacto adecuado con las partículas de lodo. Si se emplean polielectrolitos orgánicos puede emplearse el mismo método, pero la mayoría de los polielectrolitos utilizados requieren tiempos de reacción muy cortos, lo que permite la aplicación de los reactivos en la línea de alimentación de lodo. Para permitir que la coagulación y floculación ocurra adecuadamente, debe proporcionarse suficiente tiempo de retención en la tubería y en el equipo de deshidratación. Preferentemente, el lodo debe alimentarse a caudal y consistencia constantes (Eden, 1983).

6.3 Elutriación

La elutriación es una operación unitaria que consiste en el lixiviado de un sólido una mezcla sólido líquido, para eliminar diversos componentes químicos solubles.

En el tratamiento de lodos se utiliza para lavar lodos digeridos por vía anaerobia, para eliminar un exceso de alcalinidad y así disminuir la cantidad de acondicionadores químicos requeridos para facilitar su deshidratación.

Por ejemplo, mediante este proceso es factible reducir, hasta un 50% el cloruro férrico requerido para acondicionar lodos biológicos digeridos (Vesilind, 1979). Sin embargo, es importante considerar que si el agua de lavado se recircula a la sección de tratamiento biológico, puede causar problemas de sobrecarga en el sistema debido a las altas concentraciones de material en suspensión. Su instalación siempre debe estar justificada por el ahorro que origina la reducción de los productos químicos utilizados, por lo que debe ser contemplado en conjunción con el acondicionamiento químico y con la deshidratación.

6.3.1 Descripción del proceso

La operación consiste primero, en mezclar perfectamente el lodo con agua de lavado en un proceso a contracorriente, generalmente en etapas múltiples, después permitir su espesamiento mediante sedimentación y separar ambas corrientes. Cada combinación de mezclado y lavado constituye una etapa del proceso. Se dice que una etapa es ideal cuando la concentración del componente lixiviado, en este caso la alcalinidad, es igual en el agua de lavado y en el lodo. El mezclado y separación pueden llevarse a cabo en un solo tanque, pero generalmente se utilizan tanques separados.

El proceso puede llevarse a cabo de forma intermitente o continua. La primera opción permite un control más riguroso del proceso y requiere menos equipo, mientras que la segunda proporciona más flexibilidad al proceso y puede diseñarse para trabajar fácilmente en etapas; sin embargo exige más y mejor equipo.

Cuando la elutriación se lleva a cabo en un solo tanque (ver figura 6.5) pueden efectuarse sucesivamente etapas múltiples. La ecuación 6.9 presenta el balance de masa para este sistema.

$$(RW/n) + D = (RE/n) + E \quad (6.9)$$

donde:

- n número de etapas;
- R relación entre el agua de lavado y el lodo, en todas las etapas;
- W alcalinidad del agua de lavado, mg/l;
- D alcalinidad del lodo antes de la elutriación, mg/l;
- E alcalinidad del lodos después de la elutriación, mg/l.

La alcalinidad después de n etapas, E_n , suponiendo volúmenes constantes de agua de lavado en cada etapa, se determina con la ecuación 6.10, mientras que la relación entre el agua de lavado y la alimentación de lodo se obtienen con la ecuación 6.11.

$$E_n = \frac{D + W[(R/n + 1)^n - 1]}{(R/n + 1)^n} \quad (6.10)$$

$$R = n \{ [(D - W) / (E - W)]^{1/2} - 1 \} \quad (6.11)$$

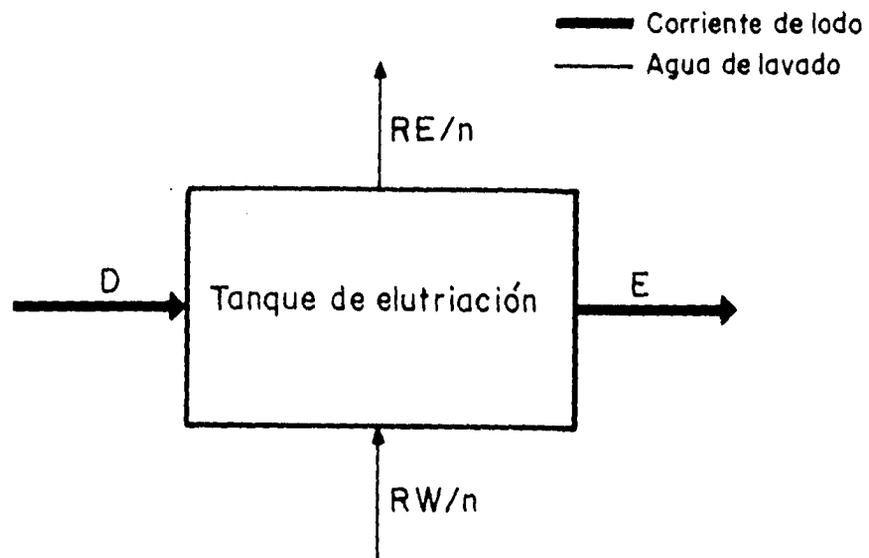


Fig. 6.5 Diagrama de un proceso de elutriación en un solo tanque

Cuando el proceso se lleva a cabo en dos tanques (ver figura 6.6), la alcalinidad del lodo y la relación entre agua de lavado y el lodo se determina mediante las ecuaciones 6.12 y 6.13 respectivamente.

$$E_n = \frac{D(R - 1) + WR(R^n - 1)}{R^{n+1} - 1} \quad (6.12)$$

$$\frac{R^{n+1} - 1}{R - 1} = \frac{D - W}{E - W} \quad (6.13)$$

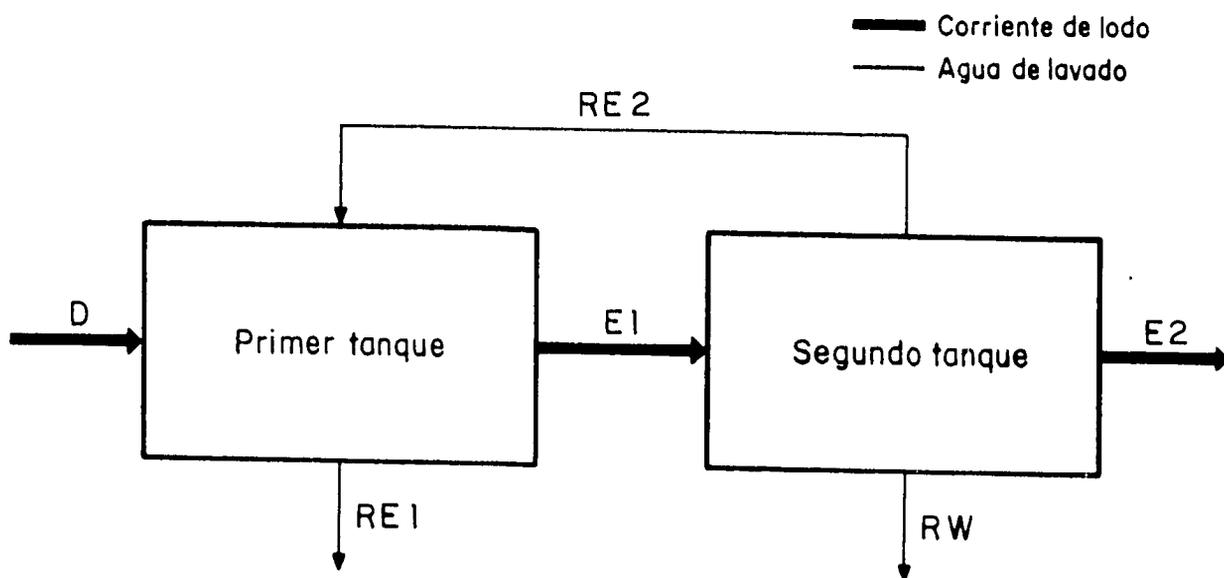


Fig. 6.6 Diagrama de un proceso de elutriación a contracorriente de varias etapas en dos tanques.

6.3.2 Consideraciones de diseño

Los tanques de elutriación se diseñan normalmente bajo las mismas consideraciones que los espesadores por gravedad (ver capítulo 4). Algunas de ellas son las siguientes:

- Tipo de lodo;
- concentración de sólidos en el lodo;
- porcentaje de sólidos volátiles (los lodos con menor porcentaje de material volátil son más densos);
- método de operación;
- relación entre el volumen de agua de lavado y el de la alimentación de lodo;
- programa de operación.

Los factores de carga que normalmente se utilizan en el diseño de los tanque para elutriación fluctúan entre 39 y 50 kg/m²d (Vesilind, 1979; Qasim, 1985). Metcalf (1979) recomienda una carga volumétrica máxima de 0.245 m³/m²d para mezclas de lodos primarios y lodos activados.

La determinación de la relación entre agua de lavado y lodo es otro factor importante para el buen funcionamiento del sistema. Qasim (1985) recomienda valores para dicha relación entre 2 y 6, mientras que Eden (1983) informa que utilizando entre 3 y 5 volúmenes de agua de lavado por uno de lodo, la alcalinidad de bicarbonatos en el lodo puede reducirse aproximadamente, de 4,500 mg/l a 2,00 mg/l. Como agua de lavado puede utilizarse el efluente del sedimentador primario, agua de pozo, o el efluente de la planta.

Es importante considerar que mediante este proceso, además de eliminar alcalinidad, se reduce de manera importante la concentración de nitrógeno en el lodo lo cual reduce su valor fertilizante. Cuando se planea la disposición del lodo utilizándolo como acondicionador de suelos, no es recomendable la elutriación (Vesilind, 1979).

7. DESHIDRATACION

El proceso de deshidratación en lodos se efectúa principalmente para reducir la cantidad de lodo que requiere disposición final y para facilitar su manejo. Puede llevarse a cabo mediante sistemas mecánicos o mediante lechos de secado. Entre los sistemas mecánicos empleados se encuentran los filtros rotatorios al vacío, centrífugas, filtros prensa y filtros banda. Los lechos de secado se recomiendan para instalaciones pequeñas con una baja producción de lodos y cuando se dispone de terreno suficiente.

En el diseño de un sistema adecuado para la deshidratación de lodos es importante tomar en cuenta la cantidad y características del lodo, y otras consideraciones como el tratamiento previo y posterior a que debe sujetarse el lodo, restricciones legales a cerca de la concentración de sólidos con que debe disponerse, método de disposición o utilización final, etc.

A continuación se describe el proceso y las consideraciones para el diseño de sistemas de deshidratación en lechos de secado, filtros prensa y filtros banda.

7.1 Lechos de secado

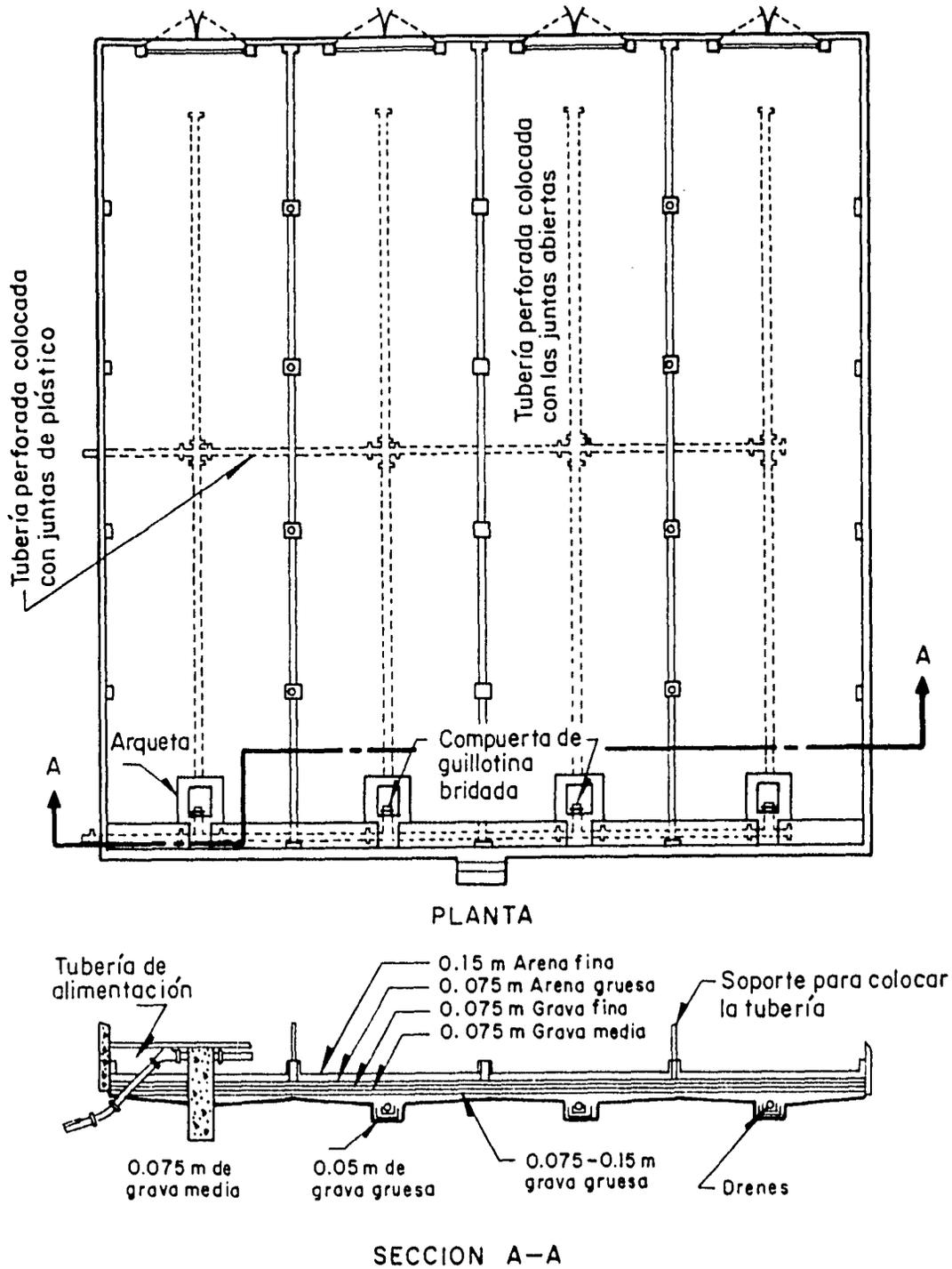


Fig. 7.1 Planta y corte de la estructura de soporte y sistemas para recolección de escurrimientos en un lecho de secado típico

Los lechos de secado se han empleado para la deshidratación de lodos desde principios de siglo y aún se consideran entre los métodos más comunes. Se recomiendan principalmente para instalaciones medianas o pequeñas que manejen en promedio caudales iguales o menores que 85 l/s, debido a que requieren grandes extensiones de terreno y elevada labor manual para levantar el lodo seco; sin embargo, debido a la aparición de sistemas mecánicos modernos para levantar la torta de lodo, al desarrollo de mejores técnicas para el diseño de los lechos, al acondicionamiento con polielectrolitos orgánicos y al incremento en los costos de energía, la deshidratación de lodos residuales en plantas de mayor tamaño mediante lechos de secado ha ido en aumento (WPCF, 1983).

Normalmente se utilizan lechos de arena, formados por una capa de arena fina sobre otra capa de grava graduada, sobre el que se descarga el lodo húmedo. La estructura de soporte debe equiparse con un sistema colector interno constituido principalmente de tubos perforados, para canalizar el agua que drena por gravedad a través del lodo, como se muestra en la figura 7.1.

Si los lechos de secado son diseñados y operados apropiadamente, son menos sensibles a variaciones en la concentración de sólidos del influente que los sistemas mecánicos para deshidratación de lodos y, en general, si se permite suficiente tiempo de secado pueden producir una torta más seca.

7.1.1 Principios de operación

El objetivo principal de los lechos de secado es reducir el contenido de humedad del lodo hasta un nivel apropiado para levantar la torta y para cubrir los requerimientos de su transporte y disposición final. La duración de cada ciclo de secado depende principalmente del tipo de lodo, de la concentración de sólidos requerida en el lodo deshidratado y de las condiciones climatológicas locales.

La concentración de sólidos requerida en el lodo deshidratado depende de las restricciones legales o ambientales de la zona. Si no las hay, se recomienda levantar

el lodo a una concentración de sólidos entre 25 y 30% ya que el lodo se puede levantar fácilmente del lecho sin pérdidas de arena excesivas.

Los mecanismos que rigen el proceso son el drenado por gravedad del agua libre a través del lodo y del lecho de arena, y la evaporación hasta alcanzar la concentración de sólidos deseada.

Inicialmente la eliminación de agua por drenado a través del lodo es el mecanismo que controla el proceso. Se lleva a cabo casi totalmente durante los primeros días después de su aplicación, hasta que drena gran parte del agua libre, o bien la arena se obstruye parcialmente con sólidos finos. En ocasiones, se forma una capa de sobrenadante sobre el lodo, la cual es importante decantar y eliminar, sobre todo en temporadas de lluvias durante las cuales el proceso de secado en lechos puede ser muy lento si se permite que se acumule agua en la superficie del lodo. La fracción de agua que permanece después de la etapa de drenado y del decantado si se lleva a cabo, se elimina por evaporación.

La cantidad de agua que puede eliminarse por drenado depende del tipo de lodo y del acondicionamiento, si se llevó a cabo. Puede variar desde 25% para lodos activados estabilizados mediante digestión aerobia, hasta 75% o más para lodos primarios bien acondicionados. Normalmente, el drenado por gravedad es significativo durante los primeros 3 a 5 días desde la aplicación al lecho, pero después se reduce considerablemente y el proceso es controlado por la velocidad de evaporación (EPA, 1987). Esta es función de las condiciones ambientales locales y de las características superficiales del lodo.

La velocidad de evaporación de la zona puede estimarse en cada estación del año mediante valores obtenidos en evaporímetros o en cuerpos acuíferos naturales. Dado que la corteza que se forma en la superficie del lodo inhibe la evaporación, los valores del evaporímetro deben ajustarse. Con base en la experiencia de gran número de instalaciones se recomienda un factor de corrección de 0.6 (EPA, 1987).

Una vez que la superficie del lodo se fractura, la tasa de evaporación se aproximan a los valores obtenidos en el evaporímetro debido a las superficies adicionales que quedan expuestas al aire.

7.1.2 Consideraciones de diseño

La operación y diseño de los lechos de arena dependen básicamente de los siguientes parámetros:

- Concentración de sólidos en el lodo aplicado;
- concentración de sólidos requerida en la torta de lodo;
- tipo de lodo (estabilizado, espesado, acondicionado);
- velocidad de evaporación y drenado del agua;
- profundidad de la capa de lodo aplicada;
- porcentaje de agua eliminada mediante drenado;
- método empleado de estabilización;
- método empleado para levantar la torta de lodo; y
- método de utilización o disposición final.

La determinación más importante en el diseño de lechos de secado es el área superficial que requiere el lecho para obtener la concentración de sólidos deseada en el tiempo especificado.

La mayoría de los lechos se diseñan con base en criterios de carga. En un principio, estos criterios eran estimaciones empíricas de carga de sólidos por persona, lo cual es válido siempre y cuando se mantengan las condiciones originales bajo las que se efectuó el diseño. Esto no siempre es el caso en los sistemas modernos.

Los criterios de carga aceptados actualmente para lechos descubiertos, para lodos digeridos y sin acondicionamiento se presentan en la tabla 7.1. Si se utilizan lechos cubiertos, la carga de sólidos para mezclas de lodos primarios y exceso de lodos activados puede elevarse hasta entre 85 y 140 kg/m² año. Por otro lado, la aplicación de coagulante químicos ofrece considerables incrementos a los valores presentados en dicha tabla. El límite superior de los intervalos indicados debe emplearse en climas calurosos o cuando se trata de lodos cuya estructura permita que el agua drene fácilmente.

7

TABLA 7.1 CARGA DE SÓLIDOS PARA EL DISEÑO DE LECHOS DE SECADO DESCUBIERTOS, PARA LODOS DIGERIDOS ANAEROBICAMENTE Y SIN ACONDICIONAMIENTO (EPA, 1987).

Tipo de lodos	Carga de sólidos, kg/m ² •año
Primarios	120 - 200
Primarios + químicos ^a	100 - 160
Primarios + Filtro percolador	100 - 160
Primarios + Lodos activados	60 - 100

^a Lodos químicos

Las ecuaciones 7.1 a 7.4 relacionan la concentración de sólidos final e inicial, la cantidad de agua eliminada por evaporación y drenado, y otros parámetros de operación críticos. Se consideran las ecuaciones fundamentales para el diseño de lechos de secado, ya que con ellas es factible determinar la carga de sólidos adecuada a un lecho de arena (EPA, 1987).

$$t_d = \frac{y_o (1 - S_o/S_f)(1 - D)}{k_e E_v} \quad (7.1)$$

donde:

- t_o tiempo de deshidratación en una sola aplicación, en meses
- y_o profundidad inicial de la capa de lodo aplicada, en cm
- S_o conc. inicial de sólidos secos requerida para la deshidratación, en %
- S_f conc. final de sólidos secos requerida para la deshidratación, en %
- D fracción de agua eliminada por drenado, por ciento decimal
- E_v evaporación promedio durante el tiempo de deshidratación (valor obtenido en evaporímetro), en cm/mes; y
- k_v factor de reducción de la evaporación del lodo, por ciento decimal
- $k_v \approx 0.6$ (se recomienda determinar este factor en estudio a nivel piloto)

El número de aplicaciones permisibles durante la operación en determinada estación del año (o mientras la tasa de evaporación no difiera significativamente) está dada por la ecuación siguiente:

$$N = \frac{n_v}{t_d} = \frac{n_v E_{vn} k_e}{y_o(1 - S_o/S_f)(1 - D)} \quad (7.2)$$

donde:

- N número de aplicaciones de lodo;
- n_v intervalo de operación de la estación, en meses; y
- E_{vn} valor de la evaporación promedio en evaporímetro durante el período n_v , en cm/mes

Mientras que la carga de sólidos de diseño está determinada por la ecuación 7.3:

$$L = \frac{(10.4 S_o n_v E_{vn} k_e)}{(1 - S_o/S_f)(1 - D)} \quad (7.3)$$

donde:

- L carga de sólidos durante el período n_v , kg/m²;
- 10.4 factor de conversión considerando la densidad relativa del lodo ≈ 1.04

La carga de sólidos anual se determina mediante la suma de los resultados de la ecuación 7.3 para diferentes períodos seleccionados, durante un ciclo de operación anual de 12 meses. Para obtener una primera aproximación, se supone $n_v = 12$ y se utiliza en promedio de evaporación anual para E_{vn} , si los lechos serán operadores en base anual.

La profundidad final de la capa de lodo deshidratado está determinado por la ecuación siguiente:

$$y_f = y_o (S_o/S_f) \quad (7.4)$$

donde:

- y_f profundidad final de la torta de lodo, en cm

La aplicación de capas de lodo delgadas acelera la deshidratación, pero como se establece en la ecuación 7.3, la carga anual de sólidos es independiente de la profundidad de la capa de lodo en cada aplicación. Si se aplican capas de lodo demasiado delgadas se presentan algunas desventajas, como el aumento considerable de las necesidades de operación y mantenimiento y mayores pérdidas

de arena al levantar la torta de lodo, lo que genera un incremento de los costos en general. Generalmente se recomienda aplicar la capa de lodo con una profundidad mínima de 20 cm, que producirá una torta de lodo de 2 cm de profundidad para lodos cuya concentración inicial de sólidos sea aproximadamente 3% y se dejan secar hasta una concentración de sólidos de 30% (EPA, 1987). Si se utilizan sistemas mecánicos para levantar la torta, debe considerarse que al remover una capa de lodo tan delgada inevitablemente se levantarán también cantidades considerables de arena.

Para mantener los costos de operación y mantenimiento tan bajos como sea posible debe optimizarse el diseño del lecho, de manera que se aplique la máxima carga anual de sólidos con el menor número de ciclos de aplicación y remoción del lodo. Esto puede lograrse mediante cálculos sucesivos con las ecuaciones 7.1 a 7.4 hasta que convergen en la combinación más efectiva de concentración inicial de sólidos y profundidad de la capa aplicada de lodo, para cada proyecto en particular. La optimización final solo es posible con la experiencia operacional.

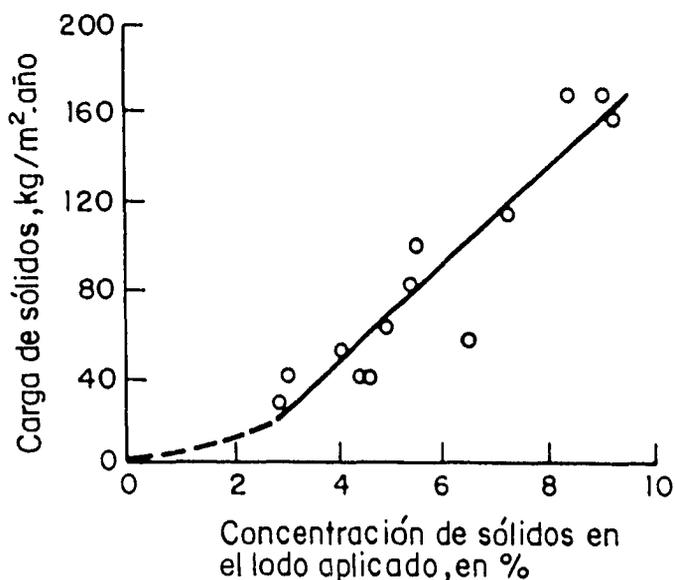


Fig. 7.2 Carga de sólidos en función de la concentración inicial de sólidos en el lodo (EPA, 1987).

La carga anual de sólidos depende de la concentración de sólidos en el lodo aplicado, como se indica en la ecuación 7.3. Esta relación se presenta en la figura 7.2 a partir de los datos de varias instalaciones en operación (EPA, 1987).

Como se muestra en la figura 7.2, un incremento en la concentración de sólidos del 2% al 4% permite aplicar prácticamente el doble de carga de sólidos y puede reducir el área del lecho requerida a la mitad. Esta relación demuestra las ventajas potenciales de espesar el lodo previamente a su deshidratación, o cuando menos llevar a cabo algún método de acondicionamiento. Sin embargo, no se recomienda aplicar un lodo cuya concentración de sólidos sea mayor a 8% porque fluye con dificultad y por lo tanto no se distribuye uniformemente sobre el lecho.

Usualmente, el área del lecho se subdivide en varias cámaras cuyo tamaño depende del volumen de la descarga de lodo del proceso de tratamiento previo. En caso de ser lodo digerido en operación intermitente, es conveniente dimensionarlas de forma que la capacidad de una o dos cámaras sea suficiente para cubrir el volumen total de lodo de una descarga del digestor.

El ancho del lecho depende del método para levantar la torta de lodo. Para instalaciones pequeñas o moderadas que remueven el lodo mediante operación manual (generalmente paleo) o semimecánica se recomienda un ancho de aproximadamente 6 m. Las instalaciones mayores o que utilizan métodos de remoción mecánica son más anchas; en ellas, cada cámara debe tener cuando menos una rampa de entrada. En cuanto a lo largo del lecho, se han empleado lechos hasta entre 30 y 60 m de longitud para lodos diluidos; sin embargo, en lechos demasiado largos la distribución uniforme de los lodos puede ser difícil, especialmente si se acondicionan con polímeros orgánicos. En este caso se recomienda que la longitud del lecho no exceda valores entre 15 y 25 m, o bien que el sistema cuente con varios puntos para la alimentación del lodo (EPA, 1987).

7.1.3 Elementos estructurales

Cada lecho de secado debe tener capacidad suficiente, ya sea en una o en varias cámaras, para contener cuando menos el volumen de una descarga del digestor o sistema de tratamiento previo. Los elementos estructurales del lechos incluyen paredes laterales, sistema de drenaje para la recolección del agua, capas de grava

y arena, separaciones entre las cámaras, decantadores, canales de distribución de lodo y caminos o rampas de acceso.

Las paredes del lecho se construyen normalmente de concreto reforzado, con una altura del bordo libre sobre la cama de arena limpia entre 0.5 y 0.9 m (WPCF, 1983).

El sistema para recolección de escurrimientos está formado por tubos perforados, normalmente de algún material plástico. Los ramales principales debe tener cuando menos 10 cm de diámetro y deben estar conectador a un colector principal o tubería de salida, con una pendiente mínima de 1% para asegurar que el líquido fluya. El espacio entre ellos varía normalmente entre 2.5 y 6 m dependiendo del método de remoción del lodo planeado. Los ramales laterales que conectan a las líneas principales deben colocarse a intervalos de aproximadamente 2.5 - 3.0 m (EPA, 1987).

Se recomienda una profundidad mínima para la capa de arena de 30 cm, pero puede aplicarse hasta de 46 cm para extender la vida del lecho. Eventualmente debe reponerse la arena que inevitablemente se pierde durante las operaciones de extracción del lodo. Se prefiere arena con las siguientes características (EPA, 1987):

- Arena limpia, que no contenga gran cantidad de partículas blandas (barro, fango, material orgánico, etc.);
- tamaño efectivo entre 0.3 y 0.75 mm;
- coeficiente de uniformidad menor que 3.5.

Para la profundidad de la capa de grava se recomiendan valores entre 20 y 46 cm, pero si el lodo será levantado mediante equipo mecánico se requiere mayor espesor de esta capa para proporcionar una estructura de soporte suficientemente fuerte que proteja la tubería interna para recolección de líquido. Las partículas de grava deben tener diámetros entre 3 y 25 mm, colocándose el material más grueso en el fondo (WPCF, 1983).

Usualmente el lecho se divide en secciones o cámaras para facilitar su operación. Sus dimensiones se establecen de manera que pueda optimizarse el método

empleado para remover el lodo; en plantas pequeñas que levantan el lodo manualmente, el lecho se divide en secciones de aproximadamente 7.5 m de ancho, mientras que cuando se utiliza equipo mecánico se requiere mayor amplitud.

El lodo puede ser alimentado a cada cámara mediante tuberías y válvulas de alimentación individuales, o bien mediante un canal abierto para la canalización del lodo mediante compuertas alrededor del lecho. El sistema de canal abierto es más fácil de limpiar después de cada aplicación de lodo, pero es más difícil de operar en climas extremadamente fríos porque el lodo fluye con dificultad. En cada punto de entrada de lodo es necesario colocar protecciones para evitar la erosión del lecho de arena.

En climas muy fríos o lluviosos, a veces es recomendable utilizar lechos con cubiertas plásticas o de fibra de vidrio, que aceleran la deshidratación y disminuye el área requerida para llevarla a cabo, a pesar de que los costos de construcción se elevan considerablemente.

7.1.4 Espectativas de funcionamiento

La velocidad de drenado durante la etapa inicial depende del tipo de lodo, de la concentración de sólidos, del tratamiento previo, y de la profundidad de la capa aplicada.

Randall y Koch (1969) informan que la velocidad de drenado del agua en lecho disminuye conforme aumenta la concentración de sólidos en el lodo aplicado, como lo muestra la figura 7.3 para lodos digeridos por vía aerobia. Aunque el tiempo de drenado para lodos con concentraciones de sólidos de 38 g/l es aproximadamente el doble que el correspondiente a lodos con concentraciones de sólidos de 7.55 g/l, el período involucrado en esta etapa es insignificante comparado con el tiempo total de secado. Por el contrario, el alto contenido de humedad en el lodo ocasionado por una concentración inicial de sólidos alta es determinante en el tiempo total de secado, como lo muestra la figura 7.4 (WPCF, 1987). Es decir, el

parámetro con mayor influencia en el tiempo de secado no es la velocidad de drenado sino el porcentaje de agua que se elimina por drenado, que a su vez determina la fracción de agua que debe evaporarse y el tiempo adicional que debe permanecer el lodo en el lecho.

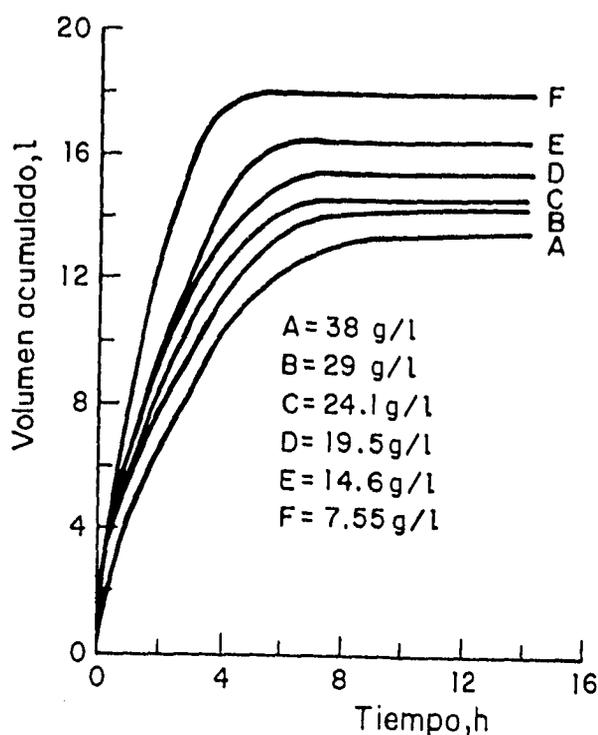


Fig. 7.3 Velocidad de drenado para lodos digeridos aplicados en una capa de 20 cm de profundidad (WPCF, 1987).

La fase de drenado por gravedad normalmente se completa en horas o pocos días, mientras que la etapa de evaporación se extiende hasta que el lodo alcanza una concentración de sólidos entre 30 y 40%, después de la cual la evaporación disminuye apreciablemente y el lodo se mantiene sin reducciones significativas de volumen. El lodo con 30% de humedad puede levantarse del lecho con facilidad sin considerables pérdidas de arena (EPA, 1987).

El agua recolectada generalmente es regresada a la sección de tratamiento de líquido. Sus características dependen del tipo de agua residual y del tratamiento al que se sujeta el lodo.

Varios autores coinciden en señalar que el porcentaje de agua que puede ser eliminado por drenado en lodos digeridos por vía aerobia es considerablemente mayor que en lodos digeridos por vía anaerobia (WPCF, 1983). De acuerdo con Randall y Koch (1969), las propiedades de deshidratación en lodos digeridos aeróbicamente dependen directamente de la oxigenación del lodo; aquellos que se obtienen de digestores en los que se mantiene una concentración de oxígeno disuelto menor a 1 mg/l deshidratarán deficientemente.

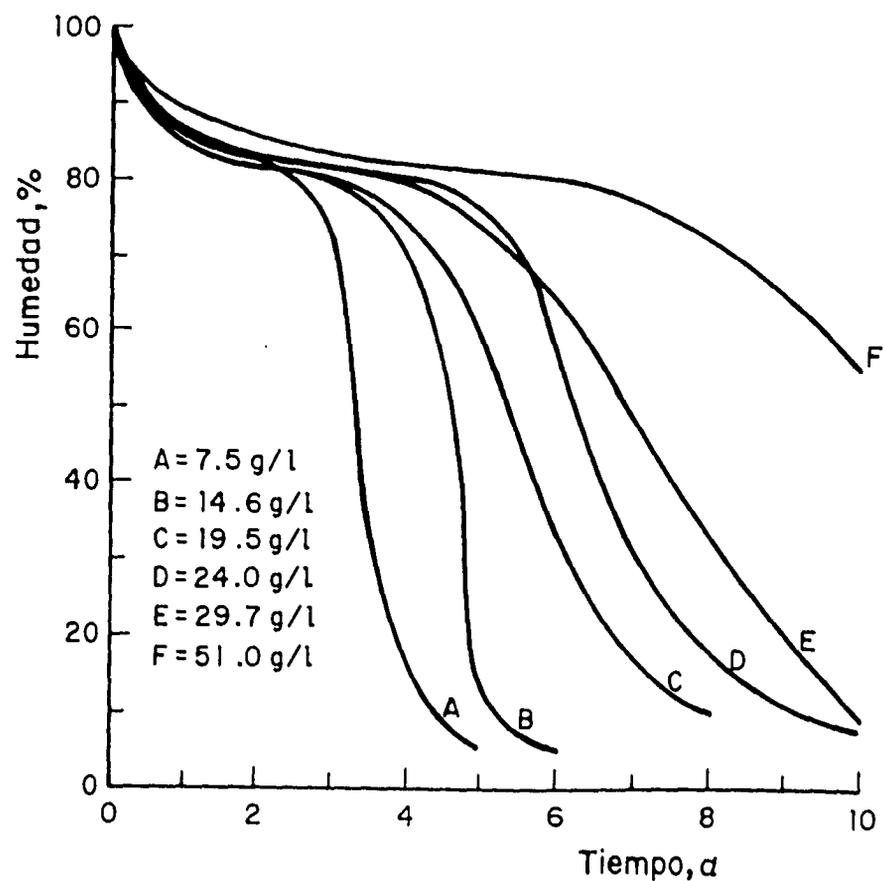


Fig. 7.4 Retención de agua en lodos digeridos por vía aerobia, aplicados en una capa de 20 cm de profundidad (WPCF, 1987).

Los lodos crudos generalmente contienen altas proporciones de materiales fibrosos y grasos, que al deshidratarlos en lechos de secado favorecen la formación de una capa densa en la superficie del lodo. De otra forma, los lechos con lodos digeridos presentan una superficie que al ir secando se fractura fácilmente, lo que produce los siguientes efectos: permite aumentar el área expuesta a la atmósfera facilitando la evaporación, aumenta la cantidad de agua eliminada por drenado, y permite que el agua de lluvia pase más fácilmente a través del lecho hacia la red colectora de agua (WPCF, 1983).

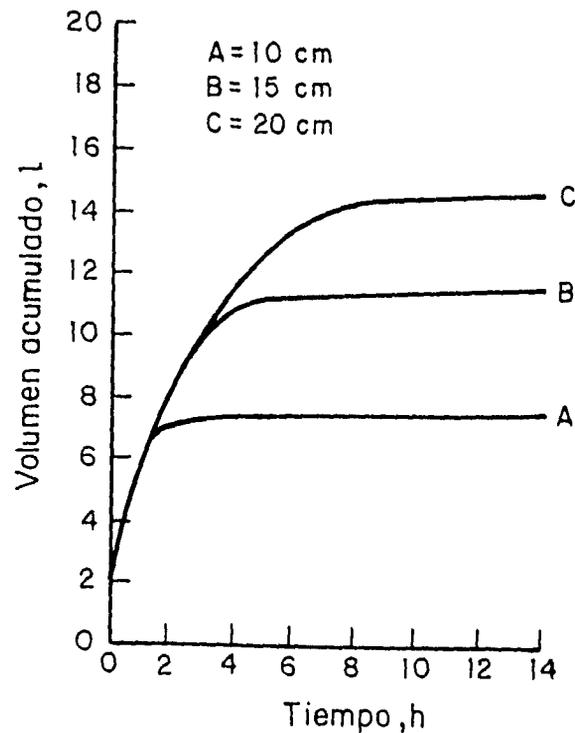


Fig. 7.5 Velocidad de drenado para lodos digeridos aeróbicamente a una concentración de sólidos de 29 g/l a diferentes profundidades de la capa de lodo (WPCF, 1987)

La velocidad de drenado también depende de la profundidad de la capa de lodo aplicada. Dependiendo del tiempo total de secado y del método de remoción de la torta, se recomienda aplicar una capa de lodo entre 20 y 40 cm, considerando que la profundidad óptima debe corresponder a una carga de sólidos entre 10 y 15 kg/m² (WPCF, 1983). Randall y Koch (1969) informan que a una determinada

concentración de sólidos y profundidad de la capa de lodo aplicado, la velocidad de drenado se mantiene constante después de 8 hr de la aplicación, como lo muestra la figura 7.5.

El espesor de la torta de lodo deshidratado es función básicamente de la concentración inicial de sólidos y de la profundidad de la capa aplicada, relación que se ilustra en la figura 7.6.

Las condiciones climatológicas constituyen otro factor importante que afecta el funcionamiento de los lechos de secado. El tiempo de secado es menor en climas calurosos, de baja humedad y poco lluviosos.

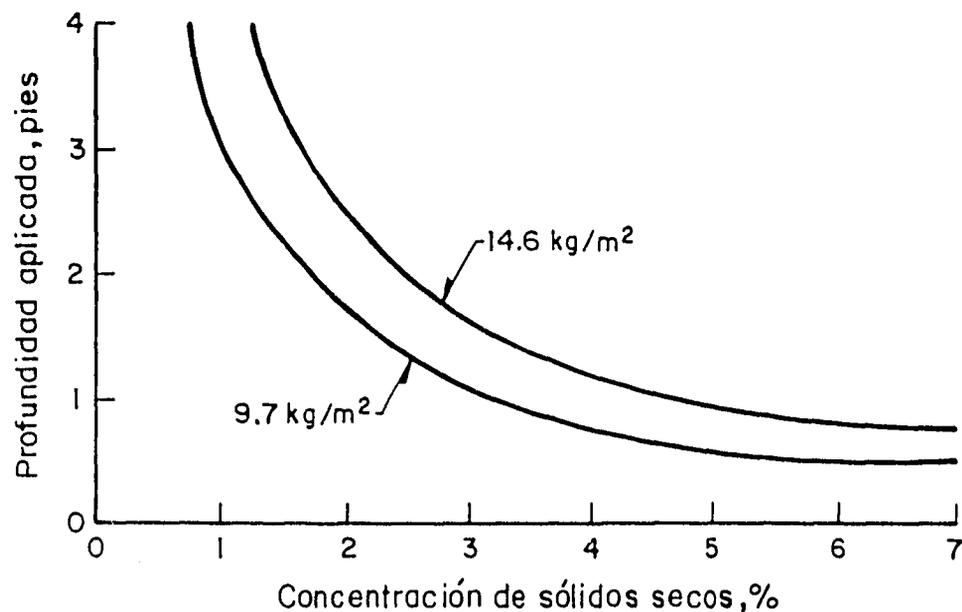


Fig. 7.6 Profundidad requerida de la capa de lodo aplicada para obtener una carga óptima a diferentes concentraciones iniciales de sólidos (WPCF, 1987).

7.1.5 Operación y mantenimiento

La operación de los lechos de arena se caracteriza por su sencillez. Involucra principalmente actividades relacionadas con la aplicación del lodo, la aplicación de acondicionadores y la remoción de la torta.

La planeación de los ciclos de aplicación y remoción del lodo debe efectuarse con base en consideraciones como tipo y características del lodo, contenido de humedad requerido en la torta y condiciones climatológicas. Generalmente, el contenido de humedad requerido en la torta de lodo es el factor que controla la mayor parte de las actividades de operación en los lechos de secado (WPCF, 1983). Aunque la primera aproximación de la profundidad de la capa de lodo aplicada se estima de acuerdo con recomendaciones estándar, la profundidad óptima debe ser determinada con base en la experiencia de operación.

Cualquier acondicionador químico debe ser aplicado de manera continua durante el bombeo del lodo, en puntos del sistema en los que se asegure un mezclado adecuado. Cuando el acondicionamiento se lleve a cabo con polímeros orgánicos se recomienda instalar varios puntos para su dosificación, que deben localizarse cuando menos en la succión de la bomba, en la descarga de la bomba y en el punto de descarga del lodo. Esta disposición de dosificadores múltiples permitirá optimizar el proceso una vez que comienza la operación.

Una vez que el lodo alcanza el contenido de humedad establecido, de acuerdo con factores como la reducción de volumen del lodo, el método de disposición final y el propio método de remoción de la torta, se procede a descargar el lecho. En plantas pequeñas generalmente se levanta el lodo manualmente mediante paleo, pero en plantas de mayor tamaño se recomienda hacerlo mecánicamente.

El mantenimiento de los lechos incluye el reemplazo de la arena perdida durante la remoción del lodo, nivelar y escarificar la superficie de arena antes de la siguiente aplicación de lodo, y la remoción de vegetación que puede crecer en el lecho. Es importante también revisar y limpiar periódicamente el sistema para recolección de escurrimientos para evitar que se obstruya, y revisar el correcto funcionamiento de válvulas y compuertas que controlan la alimentación del lodo. Si el lecho está

formado por varias cámaras, hay que asegurar que las divisiones entre ellas se mantengan resistentes para prevenir que el lodo fluya de un compartimiento a otro. Finalmente, se recomienda impermeabilizar las paredes externas del lecho (WPCF, 1983).

Para controlar malos olores o la presencia de moscas y mosquitos ocasionados por una estabilización deficiente es recomendable la aplicación de productos químicos como hipoclorito de calcio, permanganato de potasio o cloruro férrico durante la alimentación del lodo (EPA, 1987).

El tiempo requerido para llevar a cabo las actividades de operación y mantenimiento depende directamente del tamaño del sistema y del número de ciclos programados. Los sistemas pequeños (área < 100 m², carga de sólidos 100 kg/m² año) requieren un promedio de 4 h/m² año, mientras que en sistemas mayores (área > 4,000 m², carga de sólidos 100 kg/m² año) el tiempo requerido puede reducirse considerablemente hasta aproximadamente 0.5 h/m² año, debido a la economía resultante del escalamiento y que generalmente aumente el empleo de equipo mecánico (EPA, 1987).

7.2 Filtros prensa

Los filtros prensa constituyen uno de los sistemas mecánicos, para deshidratación de lodos de aguas residuales, más empleados en plantas que tratan un caudal superior a 1.1 m³/s (EPA, 1987). El proceso produce una torta con una concentración de sólidos muy alta, probablemente la más alta que se puede obtener por medios mecánicos: se alcanzan con facilidad concentraciones de sólidos superiores a 35% (WPCF, 1983).

La deshidratación en filtros prensa se lleva a cabo de forma intermitente. Un ciclo de filtración comprende el período de alimentación de lodo para llenar la prensa, el tiempo en el que el sistema se mantiene a presión, el lavado y la descarga de la torta. La operación del sistema requiere gran atención por parte de los operadores, sobre todo durante el período de descarga de la torta.

Entre los filtros prensa más comunes en el tratamiento de lodos se encuentran el filtro prensa de marco y placas y, recientemente desarrollado, el filtro prensa de diafragma o de volumen variable que proporciona a la torta de lodo una concentración de sólidos más alta con menos consumo de energía.

7.2.1 Principios de operación

La deshidratación en filtros prensa consiste en separar los sólidos suspendidos de una corriente líquida, al hacerla pasar a través de un medio poroso mediante la aplicación de un gradiente positivo de presión.

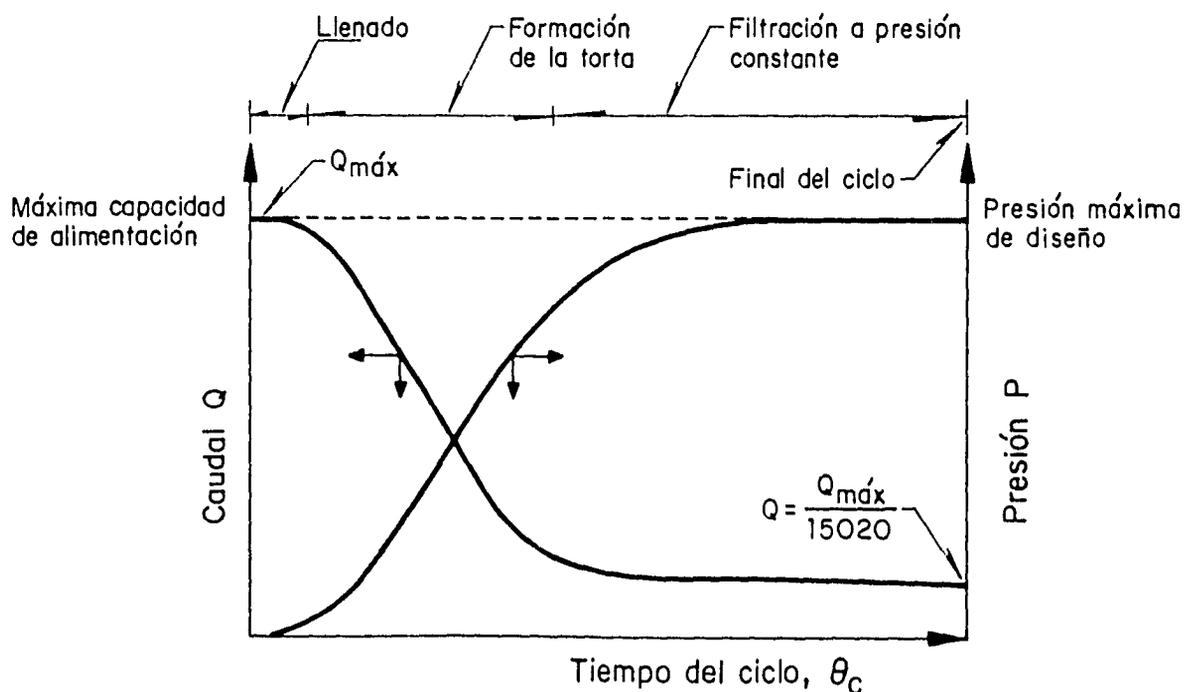


Fig. 7.7 Comportamiento típico de caudal y presión durante un ciclo de filtración en filtros prensa (WPCF, 1983).

Un ciclo típico de filtración en filtros prensa se caracteriza por variaciones temporales en la tasa de alimentación, presión y carga de sólidos. La figura 7.7 presenta la relación típica entre caudal y presión durante un ciclo de filtrado, que se considera el período durante el que se alimenta el lodo al sistema, denotado como \emptyset_c .

Inicialmente, se presenta una etapa en la que el filtrado fluye con facilidad, debido a que la resistencia a la filtración es baja y permanece así hasta que se acumulan suficientes sólidos en la superficie de la tela filtrante, por lo que comienza a aumentar la resistencia a la filtración y por consiguiente la presión. La etapa siguiente se caracteriza por un aumento paulatino de la presión y una reducción relativamente constante en la tasa de alimentación de lodo, ocasionada por la creciente acumulación de sólidos entre las placas hasta que se forma la torta, provocando una gran resistencia al paso del filtrado a través de ella por un notable cambio en su porosidad. En esta etapa la presión seguirá aumentando a una velocidad decreciente hasta alcanzar la presión límite, que permanece prácticamente constante, mientras el caudal continúa disminuyendo (WPCF, 1983). Aunque la presión permanece constante hasta finalizar el ciclo, la acumulación de sólidos continuará en proporción a la tasa de alimentación.

7.2.1.1 Filtros prensa de marco y placas

Los filtros prensa de marco y placas, también llamados de volumen fijo, están formados de una serie de placas cubiertas con tela filtrante, sostenidas sobre un marco para asegurar su alineación. Por la naturaleza pseudoplástica de los lodos de aguas residuales (ver sección 2.3.1), se utilizan normalmente placas de paredes cóncavas (ver figura 7.8). Entre los marcos y placas se forman cavidades de paredes porosas a las que se alimenta el lodo. Las placas y marcos se encuentran prensados entre un extremo fijo y un extremo móvil, activado por un mecanismo hidráulico o electromecánico.

Como se muestra en figura 7.8, el lodo, previamente acondicionado, se alimenta al espacio formado entre las placas y se aplica presión para forzar el paso del agua a través de la tela filtrante, de los orificios que canalizan el filtrado y posteriormente a través de conductos para su descarga. Los marcos, tela filtrante y placas, dispuestos en pilas horizontales y alternados, se mantienen firmemente unidos desde el inicio del ciclo, en el que comienza la alimentación del lodo a presiones entre 4 y 14 kg/cm². El medio filtrante captura la mayor parte de los sólidos suspendidos y permite el paso del líquido a través de las placas. Se permite la acumulación de sólidos hasta que la tasa de alimentación desciende hasta su límite inferior, que generalmente equivale al caudal máximo entre 15 o 20, durante el que se suspende el bombeo de lodo y se detiene la aplicación de presión. Posteriormente, se abre la prensa para descargar la torta de lodo, con lo que se completa el ciclo total de filtración.

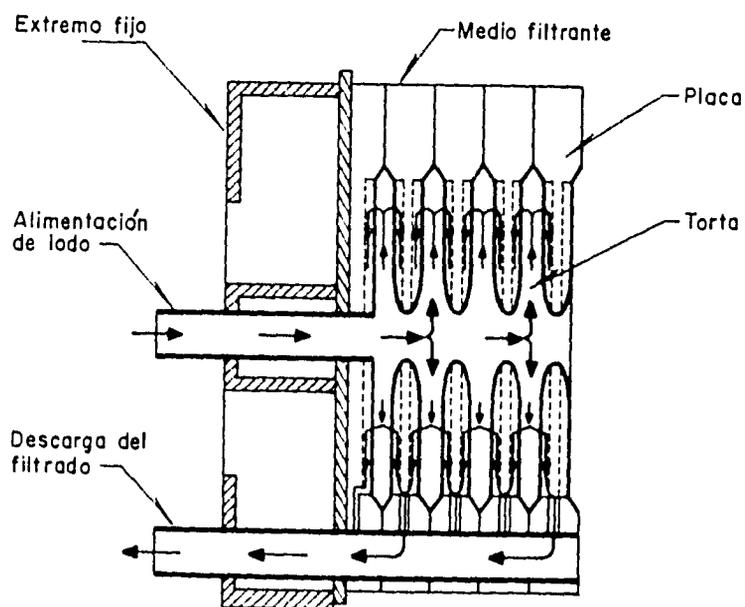


Fig. 7.8 Corte de un filtro prensa de marco y placas con placas huecas típico (WPCF, 1987).

7.2.1.2 Filtros prensa de diafragma

Los filtros prensa de diafragma o de volumen variable incorporan una membrana flexible o diafragma entre las placas, detrás de la tela filtrante. Funciona de manera similar al filtro prensa de volumen fijo pero, en este caso, una vez que se ha cargado el filtro se aplica presión relativamente baja (entre 7 y 10.5 kg/cm²) para comenzar a formar la torta de lodo. Posteriormente se detiene la alimentación de lodo y se inicia una etapa de compresión adicional mediante la aplicación de aire o agua a presión al diafragma.

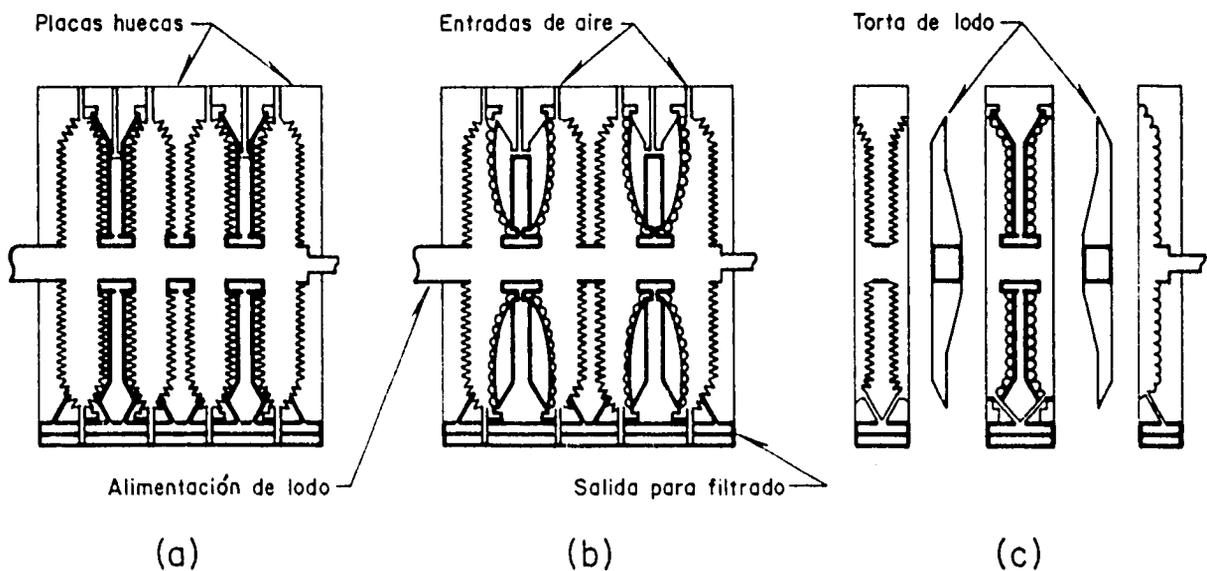


Fig. 7.9 Operación de un filtro prensa de diafragma (a) etapa de llenado; (b) etapa de compresión con el diafragma; (c) descarga de la torta (WPCF, 1987).

La figura 7.9 ilustra la operación de este tipo de filtro, que proporciona mayor flexibilidad al sistema e incrementa la tasa de deshidratación, reduciendo la duración de los ciclos de secado (WPCF, 1983).

Este tipo de filtros prensa ofrece algunas ventajas sobre los filtros prensa de volumen fijo, porque requieren menor capacidad, producen una torta de lodo mucho más delgada y porque generalmente son equipos con alto grado de automatización (WPCF, 1987).

7.2.2 Descripción del equipo

Los componentes principales del filtro prensa incluyen los siguientes: placas, marcos, tela filtrante, mecanismo para cerrar la prensa, mecanismo para desplazar las placas y equipo auxiliar como colectores de escurrimientos, cables o barras para fracturar y separar la torta de lodo, alarmas, etc. Actualmente, existen diseños con diversas opciones de ellos que deben ser evaluados cuidadosamente al seleccionar el equipo adecuado.

La estructura de soporte del filtro está formada por el extremo fijo, el extremo móvil y las barras o carriles que sostienen a las placas. Los filtros de mayor tamaño emplean soportes intermedios entre ambos extremos, para proporcionar mayor firmeza a las barras.

Los filtros prensa de placas ahuecadas o cóncavas se utiliza casi exclusivamente para deshidratación de lodos (WPCF, 1983). Las placas pueden ser de diversas formas, dimensiones y materiales; se construyen de manera que el espacio formado entre ambas caras de las placas y los marcos se mantiene constante, para la formación de la torta de lodo. Los marcos proporcionan firmeza adicional a la estructura y previenen la deflexión de las placas en el área cóncava.

Las placas son generalmente rectangulares, pero también pueden ser cuadradas o redondas, cuyo diámetro fluctúa de 0.5 a 2.0 m. Se fabrican con un orificio central relativamente grande para la alimentación de lodo, y con orificios pequeños que

La figura 7.9 ilustra la operación de este tipo de filtro, que proporciona mayor flexibilidad al sistema e incrementa la tasa de deshidratación, reduciendo la duración de los ciclos de secado (WPCF, 1983).

Este tipo de filtros prensa ofrece algunas ventajas sobre los filtros prensa de volumen fijo, porque requieren menor capacidad, producen una torta de lodo mucho más delgada y porque generalmente son equipos con alto grado de automatización (WPCF, 1987).

7.2.2 Descripción del equipo

Los componentes principales del filtro prensa incluyen los siguientes: placas, marcos, tela filtrante, mecanismo para cerrar la prensa, mecanismo para desplazar las placas y equipo auxiliar como colectores de escurrimientos, cables o barras para fracturar y separar la torta de lodo, alarmas, etc. Actualmente, existen diseños con diversas opciones de ellos que deben ser evaluados cuidadosamente al seleccionar el equipo adecuado.

La estructura de soporte del filtro está formada por el extremo fijo, el extremo móvil y las barras o carriles que sostienen a las placas. Los filtros de mayor tamaño emplean soportes intermedios entre ambos extremos, para proporcionar mayor firmeza a las barras.

Los filtros prensa de placas ahuecadas o cóncavas se utiliza casi exclusivamente para deshidratación de lodos (WPCF, 1983). Las placas pueden ser de diversas formas, dimensiones y materiales; se construyen de manera que el espacio formado entre ambas caras de las placas y los marcos se mantiene constante, para la formación de la torta de lodo. Los marcos proporcionan firmeza adicional a la estructura y previenen la deflexión de las placas en el área cóncava.

Las placas son generalmente rectangulares, pero también pueden ser cuadradas o redondas, cuyo diámetro fluctúa de 0.5 a 2.0 m. Se fabrican con un orificio central relativamente grande para la alimentación de lodo, y con orificios pequeños que

canalizan el filtrado, situados en las esquinas del área hueca. Las superficies en las orillas, tanto de las placas como de los marcos, deben ser totalmente lisas para que sellen perfectamente cuando se cierre la prensa.

El material de las placas puede ser acero recubierto de alguna resina epóxica o de caucho, hierro o polipropileno. Las placas de acero recubiertas de resina epóxica ofrecen una buena resistencia, peso moderado y costos iniciales relativamente bajos, pero son altamente susceptibles a la corrosión si se daña el recubrimiento. Por otro lado, el recubrimiento de caucho es más duradero y resistente a la corrosión de productos químicos que otro tipo de recubrimientos; las placas de acero con este tipo de recubrimiento ofrecen costos iniciales moderados, peso moderado y buena resistencia. Los fabricantes de placas de acero recubiertas de caucho recomiendan que no se opere a temperaturas menores a 4°C para prevenir que el recubrimiento sufra contracciones térmicas o fracturas (WPCF, 1983). Las placas de hierro proporcionan mayor fortaleza al sistema con una resistencia razonable a la corrosión química; sin embargo, son mucho más pesadas y costosas que las placas de acero. Las placas de polipropileno, recientemente introducidas al mercado, son las más económicas, ligeras y resistentes a la corrosión, con la única desventaja de ofrecer menor fortaleza al sistema que generalmente se compensa con un mayor espesor de las placas.

Al seleccionar la tela filtrante apropiada debe considerarse su durabilidad, facilidad para desprender la torta de lodo, el tamaño de los orificios de la malla y que sea resistente a los productos químicos aplicados al lodo, entre otras cosas. Existen en diversos materiales, tejido de la malla y permeabilidad. El material más utilizado para la filtración de lodos de aguas residuales es el polipropileno con nylon (WPCF, 1983). El rendimiento del medio filtrante depende de varios factores que incluyen las características de la tela y ciertos factores de operación.

El mecanismo para cerrar la prensa debe mantener la fortaleza necesaria para sostener las placas bajo presión durante todo el ciclo de filtración. Puede ser accionado mediante un sistema hidráulico o electromecánico; el primero consiste de un émbolo y el mecanismo que propiamente proporciona la potencia hidráulica, mientras que el segundo tipo consta de un tornillo simple o doble, una caja de engranes y un motor eléctrico. Ambos sistemas pueden estar equipados con

controles automáticos para mantener cerrada la prensa con una fuerza constante a lo largo del ciclo.

El mecanismo mediante el que se desplazan las placas una por una hacia un extremo del filtro al finalizar el ciclo de filtración es muy importante para descargar la torta de lodo. Se localiza en las barras que soportan las placas y funciona bajo el principio de una banda sin fin o de una barra de movimiento recíprocante. Está equipada con ganchos fijos a la banda, de manera que atoran cada placa y la deslizan sobre las barras de soporte hacia un extremo del filtro una distancia entre 0.6 y 1 m. Conforme cada placa se separa del bloque, se descarga la torta de lodo de la cavidad correspondiente.

7.2.3 Sistemas auxiliares

Los sistemas de apoyo para los filtros prensa incluyen acondicionamiento de lodos, alimentación al filtro, aplicación de "filtro ayuda" al medio filtrante, manejo del filtrado, lavado del medio filtrante y el manejo de la torta. Con excepción del sistema de filtro ayuda, el resto de los sistemas de apoyo son prácticamente indispensables para el correcto desempeño del proceso.

La gran mayoría de los filtros prensa utilizan cal viva y cloruro férrico para el acondicionamiento del lodo. En el capítulo 6 se describe ampliamente este proceso.

El sistema de bombeo para la alimentación al filtro debe tener una capacidad para manejar caudales entre 2 y 126 l/s, en un intervalo de presión entre 3 y 17 kg/cm² (WPCF, 1987).

Bajo condiciones ideales el sistema de alimentación debe enviar lodo, previamente acondicionado, a una velocidad lo suficientemente alta para minimizar la duración de cada ciclo de filtración, sin que un exceso en la velocidad de alimentación no permita formar una torta de lodo uniforme y espesa. Si la tasa de alimentación no es constante, se forma una torta de lodo no uniforme, que provoca la obstrucción del medio filtrante. Además, esto ocasiona que la calidad del filtrado inicial sea

deficiente, que la presión esté desequilibrada en las cavidades y, posiblemente, que se dañe el medio filtrante y las placas.

El equipo de bombeo para la alimentación de filtros prensa debe proporcionar suficiente flexibilidad al sistema y tener capacidad para manejar líquidos viscosos. Generalmente se emplean bombas de desplazamiento positivo; por ejemplo, una bomba de diafragma de tamaño adecuado puede enviar el lodo a alta velocidad y baja presión durante la etapa de llenado de la prensa, así como a la baja velocidad y alta presión que se requieren durante las etapas de formación de la torta y aplicación de presión. Otra opción es el empleo de bombas de cavidad progresiva en combinación con recipientes a presión que permiten alimentar el filtro prensa a baja presión y a alta velocidad (ver sección 2.3).

Cuando el lodo contiene altas concentraciones de sólidos excesivamente finos y/o grasas y aceites, se recomienda llevar a cabo una operación llamada de "filtro ayuda". Consiste en alimentar a la prensa, antes de iniciar la alimentación de lodo, una mezcla de agua y otro material como cenizas de incinerador, otro tipo de ceniza fina, polvo de carbón mineral, polvo de los hornos cementeros, tierras diatomáceas, etc., hasta formar una capa delgada sobre el medio filtrante, con lo que se previene que se obstruya con las partículas finas de sólidos del lodo o que genere una filtración deficiente cuando se alimenta el lodo y facilita la descarga de la torta. Esta operación dura aproximadamente entre 3 y 5 min y se utiliza en promedio entre 0.2 y 0.5 kg del material de filtro ayuda por m² de superficie de filtración (WPCF, 1983).

Una vez que se ha concluido el ciclo de filtrado, se procede a descargar la torta de lodo. Algunas veces, las instalaciones se diseñan situando el filtro prensa sobre una elevación, de manera que la torta pueda descargarse directamente a vehículos de carga, al área de contención, o a cualquier sistema designado para su transporte al sitio de disposición final. Generalmente, es necesario fraccionar la torta de lodo en trozos pequeños antes de descargarla hacia el área de contención o a los sistemas de transporte. Normalmente los filtros prensa están equipados con barras o cables, colocados por debajo del cuerpo del filtro, para facilitar esta operación. En ocasiones, es necesario fraccionar la torta aún más, para lo que se recomienda manejar el lodo mediante transportadores de tornillo (WPCF, 1987).

El diseño de las instalaciones para almacenar el lodo deshidratado requiere especial atención y cuidado, si se considera que los lodos de aguas residuales son materiales tixotrópicos (aquellos cuya viscosidad varía con el tiempo). De acuerdo con esto, es posible que después de un largo período de almacenamiento, una torta de lodo de apariencia sólida y firme se presente como una masa gelatinosa (WPCF, 1983).

El manejo filtrado adquiere gran importancia cuando éste se recircula a la sección de tratamiento de líquido. Esencialmente, el volumen y la tasa de producción del filtrado son los mismos a los valores correspondientes a la alimentación de lodo al filtro. El filtrado se caracteriza por una baja concentración de sólidos suspendidos debido a la alta eficiencia del filtro prensa, y por una concentración de DBO relativamente alta, cercana a la concentración de DBO soluble en la alimentación de lodo.

Debido a que el volumen y la tasa de descarga del filtrado son parámetros de control valiosos para la operación del filtro prensa, es recomendable que el sistema para el manejo de filtrado incluya un dispositivo para la medición de caudales, equipado con registro y totalizador, de manera que se pueda conocer el volumen acumulado de filtrado en cada momento de la operación. Las gráficas de caudal del filtrado contra tiempo son útiles como material de apoyo para evaluar las características de deshidratación del lodo en cuestión.

Es importante que los medidores de caudal proporcionen una precisión razonable en un amplio intervalo de caudales. Algunos de ellos son vertedores de paso-V o canales Parshall (WPCF, 1983). Dependiendo de las características del filtrado y de la configuración de la tubería que puede generar excesiva turbulencia, puede formarse espuma en el medidor de caudal que, en ocasiones, dificulta la obtención de datos precisos.

Cuando el lodo desprende grandes cantidades de amoníaco, sobre todo lodos digeridos, no se recomienda que el filtrado se maneje en espacios abiertos.

El sistema para el lavado del medio filtrante es esencial para prevenir que se obstruya y para equilibrar la presión entre el medio filtrante y la descarga del filtrado. El lavado elimina residuos de torta de lodo que se mantienen unidos al

medio después de su descarga, sólidos y grasas que quedan atrapados en los orificios de la malla, etc.

Existen dos métodos para el lavado de filtros prensa, cada uno indicado en ciertos casos: lavado con agua y lavado con solución ácida. El lavado con agua puede efectuarse manualmente, placa por placa, mediante tanques portátiles con agua presión equipados con una manguera o disparador, o bien mediante equipos automáticos que funcionan rociando agua a las placas mediante aspersores localizados sobre el filtro. El lavado manual es más barato pero requiere mayor trabajo y cuidado por parte del personal de operación. El lavado con ácido se recomienda para neutralizar una alcalinidad excesiva, generalmente ocasionada por la filtración de lodos que contienen ciertos productos químicos. Se lleva a cabo *in situ* mediante el bombeo de una solución diluida de ácido clorhídrico al filtro prensa vacío y cerrado, para hacerlo circular a través del medio filtrante y de las placas. Es necesario que un sistema para lavado ácido incluya tanques para almacenamiento de la solución, bombas para manejo de ácidos, etc. El ácido generalmente se recircula (WPCF, 1983).

7.2.4 Consideraciones de diseño

Algunos de los parámetros que determinan el diseño del sistema de filtración son: la concentración de sólidos requerida en la torta de lodo, la velocidad a la que fluye el agua a través del filtro y la captura de sólidos (EPA, 1987). La concentración de sólidos en la torta determina los costos de las operaciones subsecuentes y, en ocasiones, la necesidad de implementar cierto tratamiento previo a la deshidratación, como por ejemplo el espesamiento. Generalmente, cuando se requiere que la concentración de sólidos en la torta sea mayor aumenta el tiempo de filtrado y, por lo tanto, la velocidad a la que fluye el agua a través del filtro disminuye (EPA, 1987).

Existen algunas ecuaciones que interrelacionan a los principales parámetros de diseño, de manera que mediante la ayuda de ciertas pruebas de laboratorio, es posible establecer valores esperados para dichos parámetros de acuerdo con las

medio después de su descarga, sólidos y grasas que quedan atrapados en los orificios de la malla, etc.

Existen dos métodos para el lavado de filtros prensa, cada uno indicado en ciertos casos: lavado con agua y lavado con solución ácida. El lavado con agua puede efectuarse manualmente, placa por placa, mediante tanques portátiles con agua presión equipados con una manguera o disparador, o bien mediante equipos automáticos que funcionan rociando agua a las placas mediante aspersores localizados sobre el filtro. El lavado manual es más barato pero requiere mayor trabajo y cuidado por parte del personal de operación. El lavado con ácido se recomienda para neutralizar una alcalinidad excesiva, generalmente ocasionada por la filtración de lodos que contienen ciertos productos químicos. Se lleva a cabo *in situ* mediante el bombeo de una solución diluida de ácido clorhídrico al filtro prensa vacío y cerrado, para hacerlo circular a través del medio filtrante y de las placas. Es necesario que un sistema para lavado ácido incluya tanques para almacenamiento de la solución, bombas para manejo de ácidos, etc. El ácido generalmente se recircula (WPCF, 1983).

7.2.4 Consideraciones de diseño

Algunos de los parámetros que determinan el diseño del sistema de filtración son: la concentración de sólidos requerida en la torta de lodo, la velocidad a la que fluye el agua a través del filtro y la captura de sólidos (EPA, 1987). La concentración de sólidos en la torta determina los costos de las operaciones subsecuentes y, en ocasiones, la necesidad de implementar cierto tratamiento previo a la deshidratación, como por ejemplo el espesamiento. Generalmente, cuando se requiere que la concentración de sólidos en la torta sea mayor aumenta el tiempo de filtrado y, por lo tanto, la velocidad a la que fluye el agua a través del filtro disminuye (EPA, 1987).

Existen algunas ecuaciones que interrelacionan a los principales parámetros de diseño, de manera que mediante la ayuda de ciertas pruebas de laboratorio, es posible establecer valores esperados para dichos parámetros de acuerdo con las

características del lodo. Generalmente, las pruebas de laboratorio que se utilizan son el tiempo de succión capilar (TSC) y la resistencia específica pero, como se mencionó en el capítulo anterior, se ha demostrado que este último parámetro no refleja en ocasiones el comportamiento real del lodo y, en su lugar, se recomienda emplear el rendimiento neto de sólidos como una medida de la facilidad con la que se libera el agua del lodo (Rebhun *et al*, 1989). Debido a que la resistencia específica ha sido un parámetro ampliamente utilizado, se tienen valores de éste para diferentes tipos de lodo. Se sabe que la resistencia específica de lodos crudos varía entre 10 y 100 Tm/kg, mientras que los valores correspondientes a lodos con un acondicionamiento adecuado varían entre 0.1 y 1.0 Tm/kg (EPA, 1987).

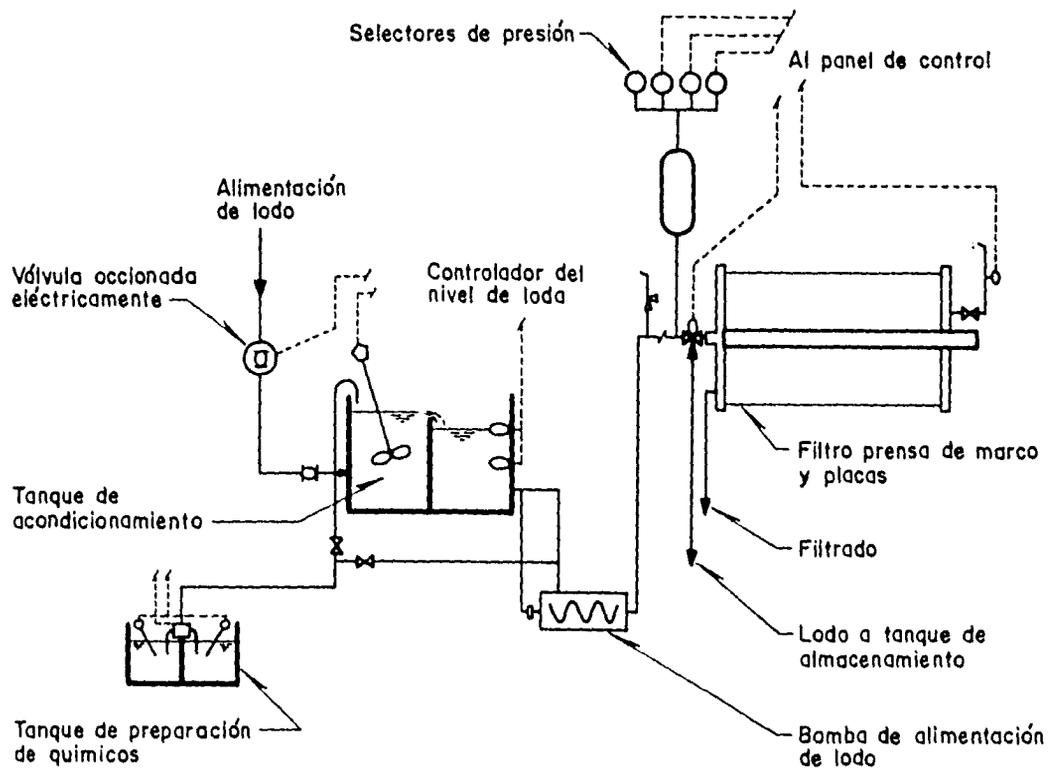


Fig. 7.10 Diagrama de flujo de un proceso de deshidratación con filtro prensa (WPCF, 1987).

El diseño de un proceso de deshidratación con filtros prensa es complejo debido al tamaño y peso del equipo, así como el espacio e instalaciones que requieren los sistemas de soporte, además de su relativa complejidad. La figura 7.10 presenta el diagrama de flujo típico de un proceso de deshidratación en filtros prensa.

El espacio destinado a la filtración no solo depende el tamaño del filtro, sino también del espacio libre que requiere alrededor para facilitar la descarga de la torta, el desmontado de las placas, y las actividades de operación y mantenimiento de rutina. Generalmente, se recomienda un mínimo de 1 a 2 m de espacio libre en los extremos del filtro, y de 2 a 2.5 m en los costados (WPCF, 1983). También debe proporcionarse suficiente espacio para la entrada de vehículos de transporte cuando la descarga de la torta se lleva a cabo directamente sobre ellos. Si el filtro es muy grande, es conveniente instalar una plataforma en uno de sus costados para facilitar el acceso a los operadores para efectuar la descarga de la torta, inspección del equipo o actividades de mantenimiento.

7.2.5 Factores de operación

Existen varios factores operacionales que determinan el rendimiento del proceso de deshidratación en filtros prensa; todos ellos deben controlarse y revisarse periódicamente. Se dividen en dos categorías: variables del equipo y variables del proceso. La primera se refiere a aquellas variables que dependen únicamente del sistema de deshidratación y la segunda a las que dependen de las características del lodo y del tratamiento previo. En general, es más fácil controlar las variables de proceso que las del equipo (EPA, 1987). Algunas variables del equipo, para un filtro prensa convencional son los siguientes:

- La presión de la alimentación de lodo;
- la tasa de alimentación y el paso del caudal de lodo hacia el filtro;
- el tiempo total de filtración, incluyendo el tiempo de cada nivel de presión, en sistemas que aplican varios niveles de presión;
- el uso de filtro ayuda y la cantidad empleada;

- acondicionamiento químico: agente, dosis, localización del sistema, eficiencia de mezclado, eficiencia de floculación;
- frecuencia de lavado del medio filtrante;
- medio filtrante empleado;
- número de placas.

Cuando se trata de filtros prensa de diafragma, además de los anteriores deben considerarse los siguientes:

- Presión del diafragma;
- duración de la compresión con el diafragma; y
- velocidad a la que se incrementa la presión del diafragma;

Para operar el sistema de manera óptima, es importante evaluar el efecto que las variaciones de algún parámetro causan en cada uno de los otros parámetros. Si se lleva un control riguroso de los factores de operación, sus variaciones son predecibles hasta cierto punto.

Por ejemplo, no se requiere el empleo de filtro ayuda cuando se acondiciona el lodo con sales inorgánicas, particularmente cloruro férrico y cal o si se emplean altas dosis de polielectrolitos orgánicos. Por el contrario, esta operación se recomienda cuando se espera una carga de lodo con alto contenido de sólidos muy finos.

Cuando se emplean cantidades considerables de cal, normalmente es necesario lavar el medio filtrante con una solución ácida y con agua; se requiere, por lo tanto, utilizar una tela filtrante resistente a la corrosión ácida y básica. Cuando se utilizan polielectrolitos orgánicos, el lavado se lleva a cabo únicamente con agua limpia a presión para eliminar el lodo infiltrado en el medio.

Algunas variables del proceso son las siguientes:

- El tipo de lodo que afecta directamente la deshidratación.
- La edad del lodo, sobre todo cuando se acondiciona con polielectrolitos orgánicos, debido a que la resistencia específica aumenta con el tiempo. Es deseable que el lodo se deshidrate lo más fresco posible.

- La aplicación de productos químicos en etapas de tratamiento anteriores al acondicionamiento para la deshidratación, particularmente si se trata de polímeros orgánicos, que pueden interferir con el acondicionamiento y consecuentemente con la deshidratación. Si esto sucede, se recomienda utilizar una pequeña cantidad de polímero de carga opuesta o sin carga predominante antes de aplicar la dosis normal del polímero usualmente empleado para eliminar los efectos del primer polímero, parcialmente degradado en la superficie del lodo.
- La concentración de sólidos del el lodo. En general, es deseable que el lodo tenga la concentración de sólidos más alta posible, por lo que se recomienda el espesamiento.
- La distribución de tamaños de partículas. En general, los lodos de aguas residuales municipales presentan una amplia variedad de tamaño y forma de las partículas, lo que favorece la formación de una estructura porosa por la que se libera el agua con relativa facilidad (WPCF, 1983).
- Captura de sólidos. Este parámetro depende de las características del lodo y de las condiciones del medio filtrante. Si se encuentra en buenas condiciones y la torta de lodo se descarga fácilmente, la captura de sólidos suspendidos es aproximadamente 90% (EPA, 1987).
- La concentración de sólidos que puede alcanzarse en la torta de lodo. Debe ser suficientemente alta para descargarse con facilidad del medio filtrante.
- Velocidad a la que fluye el agua a través del filtro. Depende principalmente de las características del lodo en cuanto a su facilidad para liberar el líquido, del tipo y dosis de acondicionadores químicos, y de la concentración de sólidos mínima deseada en la torta de lodo.
- Condiciones bajo las que se produce el lodo, particularmente si se trata de exceso de lodos activados. Esta consideración se aplica básicamente a aquellos lodos de origen doméstico que reciben cantidades importantes de residuos industriales que contienen altas concentraciones de carbohidratos

que producen, en ocasiones, deficiencia de nitrógeno en el sistema de lodos activados. Esta deficiencia causa que la resistencia específica del lodo sea más alta que cuando se produce en un ambiente rico en nitrógeno. Generalmente, la resistencia específica que presentan los lodos activados adecuadamente acondicionados, generados en condiciones normales es entre dos y tres veces menor que la que presentan los generados en un ambiente deficiente en nitrógeno (EPA, 1987).

TABLA 7.2 DATOS TÍPICOS DE LA OPERACION DE FILTROS PRENSA DE VOLUMEN FIJO Y PLACAS CONCAVAS PARA LA DESHIDRATACION DE LODOS (WPCF, 1983).

Tipo de lodo	Tiempo del ciclo, min	Acondicionamiento			Concentración de sólidos en la torta, % ^a	Concentración de sólidos en la alimentación, %
		CaO, %	FeCl ₃ , %	Otros, %		
LODOS CRUDOS						
PRI	120	10	5	-	45	5 - 10
PRI + 50% LA	150	10	5	-	40 - 45	3 - 6
PRI + 50% LA	150	12	6	-	45	1 - 4
PRI + FP	120	20	6	-	38	5 - 6
PRI + sales de fierro ^b	90	10	-	-	40	4
PRI + LA + sales de fierro ^b	180	10	5	-	45	8
LA	150	15	7.5	-	45	5
PRI + cal	90	-	-	-	50	7.5
LODOS DIGERIDOS						
PRI	120	30	6	-	40	8
PRI + LA	120	10	5	-	45	6 - 8
PRI + LA + sales de fierro ^b	180	10	5	-	40	6 - 8
PRI + 50% LA	120	10	5	-	45	6 - 10
PRI + 50% LA	150	15	7.5	-	45	1 - 5
ALTA PRESION (16.5 kg/cm²)						
PRI crudos	90	-	-	100 ^d	50	5 - 10
PRI + 50% LA crudos	120	-	-	150 ^d	50	3 - 6
PRI + 50% LA crudos	150	-	-	200 ^d	50	1 - 4
PRI + 50% LA ^c	90	-	-	100	50	6 - 10
PRI + 50% LA ^c	90	-	-	200	50	2 - 6

NOTAS: PRI Lodos primarios; LA exceso de lodos activados; FP lodos de filtro percolador.

^a incluyendo los sólidos de los acondicionadores; ^b utilizadas como coagulantes durante el tratamiento primario o secundario;

^c lodos digeridos por vía anaerobia; ^d cenizas finas

que producen, en ocasiones, deficiencia de nitrógeno en el sistema de lodos activados. Esta deficiencia causa que la resistencia específica del lodo sea más alta que cuando se produce en un ambiente rico en nitrógeno. Generalmente, la resistencia específica que presentan los lodos activados adecuadamente acondicionados, generados en condiciones normales es entre dos y tres veces menor que la que presentan los generados en un ambiente deficiente en nitrógeno (EPA, 1987).

TABLA 7.2 DATOS TÍPICOS DE LA OPERACION DE FILTROS PRENSA DE VOLUMEN FIJO Y PLACAS CONCAVAS PARA LA DESHIDRATACION DE LODOS (WPCF, 1983).

Tipo de lodo	Tiempo del ciclo, min	Acondicionamiento				
		CaO, %	FeCl ₃ , %	Otros, %	Concentración de sólidos en la torta, % ^a	Concentración de sólidos en la alimentación, %
LODOS CRUDOS						
PRI	120	10	5	-	45	5 - 10
PRI + 50% LA	150	10	5	-	40 - 45	3 - 6
PRI + 50% LA	150	12	6	-	45	1 - 4
PRI + FP	120	20	6	-	38	5 - 6
PRI + sales de hierro ^b	90	10	-	-	40	4
PRI + LA + sales de hierro ^b	180	10	5	-	45	8
LA	150	15	7.5	-	45	5
PRI + cal	90	-	-	-	50	7.5
LODOS DIGERIDOS						
PRI	120	30	6	-	40	8
PRI + LA	120	10	5	-	45	6 - 8
PRI + LA + sales de hierro ^b	180	10	5	-	40	6 - 8
PRI + 50% LA	120	10	5	-	45	6 - 10
PRI + 50% LA	150	15	7.5	-	45	1 - 5
ALTA PRESION (16.5 kg/cm²)						
PRI crudos	90	-	-	100 ^d	50	5 - 10
PRI + 50% LA crudos	120	-	-	150 ^d	50	3 - 6
PRI + 50% LA crudos	150	-	-	200 ^d	50	1 - 4
PRI + 50% LA ^c	90	-	-	100	50	6 - 10
PRI + 50% LA ^c	90	-	-	200	50	2 - 6

NOTAS: PRI Lodos primarios; LA exceso de lodos activados; FP lodos de filtro percolador.

^a incluyendo los sólidos de los acondicionadores; ^b utilizadas como coagulantes durante el tratamiento primario o secundario;

^c lodos digeridos por vía anaerobia; ^d cenizas finas

La tabla 7.2 presenta datos típicos de los parámetros de operación de sistemas para la deshidratación de lodos de aguas residuales de origen doméstico mediante filtros prensa.

7.2.6 Criterios para la selección del equipo

Al seleccionar un filtro prensa para la deshidratación de lodos es importante considerar los puntos que se enlistan a continuación por orden de importancia (EPA, 1987):

- Que cumpla con los requisitos legales o ambientales;
- que consuma la mínima energía posible;
- que genere la menor concentración de sólidos suspendidos en el filtrado, cuando éste se regresa a la sección de tratamiento secundario;
- que proporcione la mayor captura de sólidos;
- que proporcione la mayor concentración de sólidos en la torta de lodo;
- que proporcione la máxima seguridad operacional y sea un equipo de fácil manejo;
- que requiera el menor mantenimiento;
- que ofrezca la máxima flexibilidad para enfrentar cambios en la cantidad y calidad del lodo;
- que pueda establecerse el proceso dentro de los programas de construcción establecidos.

7.2.7 Operación y mantenimiento

La operación de los filtros prensa se caracteriza porque es relativamente compleja, sobre todo debido a se lleva a cabo de forma intermitente. Requiere gran actividad y atención por parte de los operadores, principalmente durante la descarga de la

torta y la limpieza del filtro. Algunos problemas de operación que pueden presentarse son: encharcamiento de líquido, obtención de un filtrado turbio, formación de una torta de lodo no uniforme, baja velocidad de filtración, deterioro de las placas, etc.

El encharcamiento de líquido se refiere a la acumulación de filtrado entre las placas, sobre la charola. Este fenómeno es normal hasta cierto punto, sobre todo al iniciar el bombeo de la alimentación; sin embargo, puede representar serios problemas de operación si se produce en grandes cantidades. Es causado frecuentemente por una limpieza deficiente de los sellos entre las placas o porque las telas filtrantes no se colocan completamente restiradas y se forman arrugas que impiden que la prensa cierre herméticamente.

La obtención de cierta turbidez en el filtrado es normal al iniciar el ciclo hasta que se forma una capa de lodo suficiente para evitar el paso de sólidos muy finos. Si se aplica filtro ayuda no debe presentarse este problema. Sin embargo, si se aplica una presión excesiva o con grandes fluctuaciones, puede ocasionar que el problema persista.

La formación no uniforme de la torta de lodo puede ser originada por diversos factores. Algunos de los más frecuentes son el empleo de una bomba de capacidad inadecuada que proporcione una presión insuficiente y la obstrucción, total o parcial, de alguno de los conductos de alimentación. Este último problema puede causar incluso la deformación de las placas.

La naturaleza de cierto tipo de lodos, por ejemplo los generados en el sistema de lodos activados, se caracterizan por una deshidratación poco eficiente que origina que la baja velocidad de filtración sea inevitable. Sin embargo, en ocasiones, este problema puede ser causado por la obstrucción del medio filtrante, o un lavado deficiente del mismo.

El manejo inadecuado de las placas puede ocasionar que se dañen, pero el principal problema que causa su deformación es la obstrucción de algún conducto de alimentación. Con esto el lodo no puede entrar a las cavidades, y toda la presión se aplica sobre un lado de las placas.

El mantenimiento del filtro prensa incluye la limpieza sistemática de las placas y del medio filtrante, así como su revisión periódica. La limpieza es determinante para aumentar la eficiencia del sistema y prevenir que las placas se deterioren prematuramente.

Es importante limpiar uniformemente el medio filtrante de todas las placas para evitar que una formación desigual de la torta en cada cavidad origine diferencias de presión considerables entre las placas, de manera que puedan deformarse; por ejemplo, si la cavidad entre dos placas con un medio filtrante limpio (que permite la formación de una torta normal) se encuentra inmediatamente antes de una cavidad cuya tela filtrante se encuentre relativamente sucio o obstruido que causa que la torta de lodo se forme posteriormente, se originará una diferencia de presiones entre las placas que puede deformarlas.

7.3 Filtros banda

El empleo de los filtros banda a presión comenzó a difundirse en Europa y Estados Unidos a partir de los años setenta (EPA, 1987). Originalmente fueron utilizados para deshidratar pulpa de papel y posteriormente, tras algunas modificaciones, se aplicaron en el tratamiento de lodos de aguas residuales. Algunas ventajas de este tipo de filtro son: la sencillez en su operación (operación continua), su bajo consumo de energía, su capacidad para manejar grandes volúmenes de lodo y la posibilidad de deshidratar eficientemente lodos secundarios (WPCF, 1983).

Su diseño se basa en un concepto muy sencillo mediante el que el lodo es prensado entre dos bandas porosas que se mantienen bajo tensión alrededor de un sistema de rodillos de diferentes diámetros, por el cual se transportan. La presión sobre el lodo y, por consiguiente, la eliminación de agua aumenta conforme el diámetro de los rodillos disminuye. Una vez que ha finalizado el proceso se separan las dos bandas, y la torta de lodo se descarga mediante un cambio brusco de dirección de la banda inferior al hacerla pasar alrededor de un rodillo. Generalmente, el sistema está equipado con una cuchilla para facilitar el desprendimiento de la torta de lodo.

Si se operan adecuadamente, los filtros banda a presión proporcionan un alto rendimiento de la deshidratación y rara vez presentan fallas mecánicas. Generalmente, se obtiene una torta de lodo con una concentración de sólidos entre 20 y 30%, con capturas de sólidos superiores a 96%.

7.3.1 Principios de operación

La deshidratación de lodos en filtros banda se efectúa mediante una combinación de la acción de la gravedad y la presión mecánica aplicada al sistema, que actúa como fuerza motriz del proceso. Se lleva a cabo al hacer pasar el lodo subsecuentemente por tres etapas básicas de operación: acondicionamiento químico de la alimentación de lodo, drenado por gravedad hasta producir un lodo de consistencia no fluida, compresión del lodo a través de un sistema mecánico de rodillos.

Después de que el lodo húmedo es acondicionado, generalmente mediante la aplicación de polielectrolitos orgánicos, el agua libre que drena fácilmente es separada del lodo al distribuirlo uniformemente sobre una banda móvil en la primera sección del filtro, llamada de drenado por gravedad. Normalmente, se requieren entre 1 y 2 minutos para completar esta etapa. Dependiendo de la concentración inicial de sólidos en la alimentación, el lodo puede reducir su volumen hasta aproximadamente un 50% y alcanzar una concentración de sólidos de 6 a 10%, después del drenado por gravedad.

La tercera etapa de la filtración comienza tan pronto como el lodo se sujeta a un incremento de presión, causado por la compresión del lodo entre la banda que lo transporta (banda inferior) y otra banda que lo cubre (banda superior que se incorpora al sistema), o bien por la aplicación de vacío en la banda inferior. La presión puede variar ampliamente mediante diversos diseños de la configuración de los rodillos, alrededor de los cuales viajan las bandas. La figura 7.11 presenta diferentes alternativas de estos diseños.

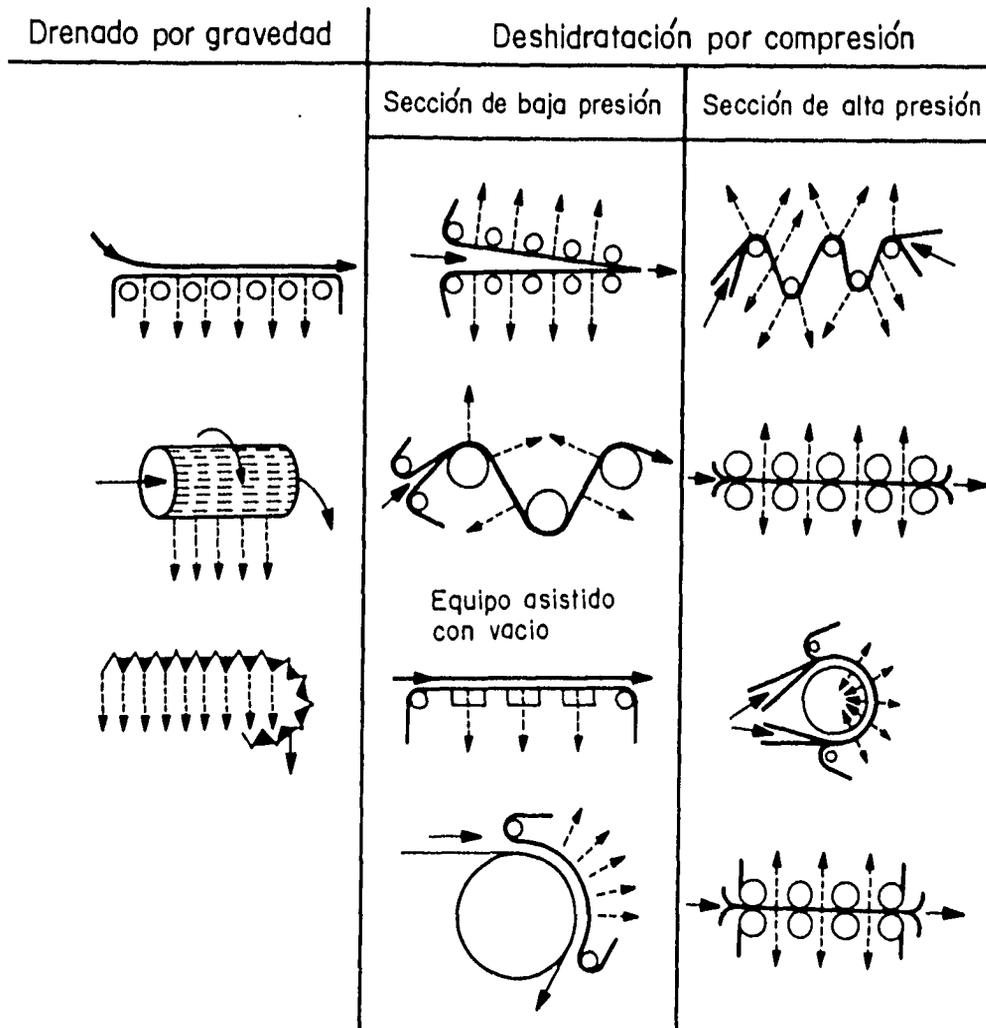


Fig. 7.11 Diseños para la disposición de los rodillos en los filtros banda a presión (Qasim, 1985).

El acondicionamiento más empleado para la deshidratación en filtros banda es el acondicionamiento químico mediante polielectrolitos orgánicos. Estos, pueden aplicarse a un tanque de floculación situado antes de la entrada al filtro, a la corriente de alimentación de lodo, o bien directamente en un punto localizado sobre la banda del filtro. El polímero debe mezclarse perfectamente con las partículas de lodo, pero sin un esfuerzo excesivo para evitar dañar los flóculos, de

manera que se forme en el lodo estructura adecuada para liberar fácilmente el exceso de agua. Este paso es el más importante para asegurar el buen funcionamiento de la deshidratación en filtros prensa (WPCF, 1983).

La deshidratación comienza cuando la mezcla de polímero y partículas de lodo se descarga del sistema de acondicionamiento a la sección de drenado por gravedad del filtro banda. Esta sección consiste normalmente de una banda porosa continua provista de una gran superficie para recibir la alimentación de lodo, a través de la cual drena el agua libre por efecto de la gravedad. Generalmente se requiere un sistema de distribución para aplicar el lodo uniformemente sobre la banda. El filtrado es recolectado y canalizado por una tubería hacia el inicio de la sección de tratamiento de líquido. El lodo deshidratado que deja la etapa de drenado por gravedad para entrar a la zona de deshidratación por compresión.

En la etapa de compresión se lleva a cabo una deshidratación adicional al aplicar presión al lodo entre dos bandas filtrantes mediante el esfuerzo cortante y la compresión que se generan al seguir las bandas una trayectoria en forma de "S" alrededor de una serie de rodillos. Generalmente, esta etapa consiste de dos secciones: sección de baja presión y sección de alta presión, dependiendo del diámetro y de la disposición de los rodillos. En la sección de alta presión la tensión de las bandas aumenta por un diámetro menor de los rodillos y/o por una disposición que genere cambios más bruscos en la trayectoria de las bandas. En la sección de alta presión, la compresión sobre la torta de lodo llega a ser suficiente para eliminar parte del agua enlazada químicamente a las partículas de lodo y posiblemente algo de líquido intracelular (WPCF, 1983). La torta de lodo obtenida se descarga de la banda inferior cuando ambas bandas se separan por medio de una cuchilla.

7.3.2 Descripción del equipo

Los componentes principales de un filtro banda a presión son los siguientes: estructura de soporte, bandas porosas, rodillos y juntas (uniones), sistema para tensionar y ajustar las bandas, sistema para el lavado de las bandas y un sistema

para la floculación del lodo, normalmente integrado a la estructura principal del filtro.

El sistema para la floculación debe diseñarse de manera que se asegure un contacto apropiado entre el lodo y el polímero aplicado, para que la aglomeración de las partículas se lleve a cabo de manera eficiente. Consiste de un tambor rotatorio o bien una cámara agitada mecánicamente, en el que se proporciona al lodo el mezclado suficiente durante el tiempo de retención necesario para permitir la floculación con los acondicionadores químicos. La cantidad de energía de mezclado requerida para producir flóculos en buenas condiciones depende del tipo de lodo, concentración de sólidos, tasa de alimentación de lodo y tipo de polímero empleado; por esto, casi todos los filtros prensa a presión cuentan con un sistema para ajustar la velocidad de rotación del tambor o del agitador mecánico. Una vez que el lodo ha sido acondicionado adecuadamente, debe ser descargado de manera uniforme sobre una de las bandas en la zona de drenado de gravedad del filtro; generalmente, se emplean mamparas para facilitar esta operación y así mejorar la deshidratación en esta zona.

La estructura principal de soporte del filtro banda normalmente se fabrica de acero con un recubrimiento para evitar la corrosión y aumentar su durabilidad. La firmeza y resistencia en esta estructura son parámetros muy importantes debido a que el resto del equipo se encuentra fijo o soportado en ella. Es importante también que el equipo sea resistente a la corrosión debido a que puede estar expuesto a gran variedad de ambientes y materiales; por ejemplo, si el lodo se almacena durante un período excesivo antes de su deshidratación, el pH puede descender hasta valores menores a 2 (WPCF, 1983). El material del recubrimiento puede ser pintura epóxica, pintura galvanizada o fibra de vidrio.

Las bandas son generalmente de fibras de poliéster. Las hay en una gran variedad de combinaciones de tejido de la malla, tamaño del orificio, permeabilidad, capacidad para capturar sólidos, durabilidad etc. Estos parámetros influyen de manera importante en el rendimiento del filtro. La selección de la combinación adecuada depende fundamentalmente del tipo de lodo; por ejemplo, un lodo que contiene una alta proporción de lodos activados (80 - 100%) requiere un malla que ofrezca alta permeabilidad y capacidad para retener sólidos finos, mientras que los lodos primarios requieren justamente las características opuestas. Debido a que el

lodo puede variar considerablemente de instalación a instalación, se recomienda, siempre que se disponga del lodo, probar diferentes combinaciones de dichas características de las mallas para seleccionar la adecuada; en caso contrario, debe seleccionarse con base en el lodo esperado y en recomendaciones del fabricante sobre experiencias en instalaciones similares.

La porosidad de las bandas se estima de acuerdo con su capacidad para permitir el paso de cierto volumen de aire por unidad de área. Las bandas que normalmente se utilizan en la deshidratación de lodos de aguas residuales domésticas tienen una porosidad entre 2,000 y 4,000 l/m² s (WPCF, 1987).

Existen bandas continuas (bandas sin costura) y bandas con una costura reforzada tipo cierre. Normalmente se utilizan estas últimas porque son más fáciles de colocar o reemplazar y, a diferencia de las bandas continuas, pueden emplearse prácticamente en todos los diseños de filtros banda a presión. Las bandas deben especificarse con una resistencia a la tensión varias veces mayor a la tensión máxima a la que se sujetarán para asegurar que soporten adecuadamente cualquier variación en la presión del sistema (WPCF, 1983).

Los rodillos y juntas constituyen el soporte mecánico del filtro. Además de mantener el soporte y tensión en las bandas, proporcionan la presión necesaria para deshidratar el lodo. El diámetro de los rodillos y tamaño de las flechas son los parámetro clave para el diseño del sistema y deben ser evaluados cuidadosamente (ver sección 7.3.4). Una vez que se han seleccionado los diámetros y disposición de los rodillos, el dispositivo para tensionar las bandas es la clave para controlar del proceso. Las juntas son componentes determinantes para soportar y dirigir los rodillos.

Los rodillos y juntas pueden ser de diversos materiales, incluyendo el acero y, al igual que la estructura principal del filtro, deben estar recubiertos para evitar la corrosión. Los rodillos deben resistir una tensión mínima de 7 kN/m, presentando una deflexión máxima permisible de 1 mm en el centro del rodillo; si se utilizan rodillos perforados, se recomienda que sean de acero inoxidable (WPCF, 1983).

En la zona de descarga de la torta el filtro está comúnmente equipado con una cuchilla de plástico duro, como polipropileno de alta densidad, para ayudar a

desprender la torta de la banda inferior y descargarla hacia el sistema de recolección para su transporte o almacenamiento. En algunos casos, la cuchilla cuenta con un sistema para ajustarla de acuerdo con las necesidades de cada caso, de manera que puede separarse un poco de la banda para evitar su desgaste excesivo.

Una vez que se separan las bandas es necesario lavarlas con agua a presión, por la superficie contraria a la que se pone en contacto con el lodo, para restituir su permeabilidad y para prevenir que se obstruyan, propiciando por consiguiente una deshidratación deficiente.

El sistema para el lavado de las bandas debe incluir una bomba de alta presión para manejar el agua de lavado, un conjunto de barras aspersoras y dispositivos para su limpieza. Normalmente, durante la operación de lavado se emplean grandes cantidades de agua de lavado (aproximadamente $3.6 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$ (EPA, 1987)) por lo que se recomienda utilizar efluente de la planta, siempre y cuando se haga pasar previamente por un sistema de filtración de alta eficiencia para evitar que contenga altas concentraciones de sólidos suspendidos o fibras que puedan obstruir los conductos y orificios para la salida del agua.

El filtro debe estar equipado también con un sistema colector de líquidos en el que convergen el agua de lavado y el filtrado, que constituyen la corriente secundaria en un filtro banda a presión, al que debe proporcionarse suficiente capacidad para manejar el agua eliminada durante la operación normal del filtro y para favorecer que fluya con facilidad hacia afuera del mismo. El tamaño y disposición de la tubería de descarga depende de la cantidad y calidad de las corrientes de líquido, que generalmente se recolectan en una poceta y se envían a la sección de tratamiento de líquido, ya sea a tratamiento primario para la separación de material sedimentable o directamente a la sección de tratamiento biológico.

Los controles del filtro pueden manejarse desde un panel a control remoto que debe incluir sistemas automáticos, semiautomáticos o manuales para iniciar y detener la filtración, mecanismos para tensionar y ajustar las bandas, indicadores de presión, dispositivos de seguridad, etc.; en ocasiones, es conveniente incluir también los controles de las bombas para el lodo y acondicionadores químicos. Si es posible, los controles debe localizarse en un sitio apartado de vibraciones, ruido,

humedad, emisión de gases, etc., desde el que puede observarse con facilidad la operación del filtro.

Es recomendable que los controles de todos los sistemas que integran el filtro banda a presión se relacionen de manera que puedan iniciar su operación, o detenerse en caso necesario, en la secuencia apropiada; por ejemplo, si el filtro falla por alguna razón, debe detenerse automáticamente la alimentación de lodo y de acondicionadores químicos.

7.3.3 Sistemas auxiliares

Para que la deshidratación en filtros banda a presión se lleve a cabo eficientemente, es importante que el filtro cuente con sistemas de apoyo adecuados como los siguientes: bombeo de lodo y de polímeros, acondicionamiento, manejo de la torta de lodo, instrumentación para revisar periódicamente el proceso, etc.

Es importante que el lodo sea bombeado mediante un equipo apropiado y confiable que proporcione un buen control en la tasa de alimentación de lodo. Generalmente, se emplean bombas de desplazamiento positivo, principalmente bombas de lóbulos o bombas de cavidad progresiva, porque mantienen una tasa de alimentación uniforme y las pérdidas de presión en la tubería prácticamente no afectan la velocidad de la descarga (WPCF, 1987). La selección del tipo y del tamaño de la bomba es determinante para la correcta operación del proceso; deben considerarse aspectos como los requerimientos hidráulicos, el tipo de lodo, el intervalo de la concentración de sólidos esperada y el equipo del que se descarga el lodo, etc.

Si se trata de mezclas de lodos primarios y secundarios es conveniente que se mezclen antes de bombearse al filtro. Entre más homogénea sea la mezcla de lodo se facilita el acondicionamiento y resulta una deshidratación más eficiente.

Normalmente, las bombas de alimentación de lodo deben estar equipadas con un sistema transmisión en el motor que permita un ajuste rápido y fácil de la velocidad

de descarga del lodo. Cuando se requiere que la variación del caudal sea muy baja puede utilizarse algunos sistemas mecánicos para ajustar la velocidad como poleas o bandas de transmisión acanaladas o de garganta, o una combinación de discos planos y cóncavos (WPCF, 1987).

Al igual que en otros sistemas para el manejo de lodos, se recomienda utilizar tubería con paredes internas lisas, incluyendo tuberías de material plástico o vitrificado. La velocidad en las líneas debe mantenerse cuando menos a 1 m/s para prevenir incrustaciones de sólidos y problemas por la obstrucción parcial de la tubería. Es conveniente disponer en ella varios orificios para la inyección de polímeros, de manera que se proporcione flexibilidad al sistema. Se recomienda instalarlos a intervalos de 0.5 a 1 min a lo largo de la tubería, con base en la relación volumen de tubería/capacidad de descarga de la bomba (WPCF, 1983).

Normalmente, los filtros banda a presión están equipados con un tanque para la floculación del lodo con polielectrolitos orgánicos. El sistema de acondicionamiento incluye cuando menos el equipo para el almacenamiento y mezclado de los polímeros, las bombas para su alimentación y equipo para el mezclado del lodo con los polímeros. Generalmente, se requiere cuando menos un tiempo de acondicionamiento de 10 min si se trata de lodos primarios y biológicos y un poco menos en el caso de lodos biológicos puros, dependiendo del tipo de polímero (WPCF, 1983).

Algunas variables del acondicionamiento que se relacionan directamente con el rendimiento del proceso de deshidratación son el tipo de polímero, el punto de inyección, el tiempo de retención y la energía de mezclado. La concentración de la solución de polielectrolito, así como la tasa de alimentación determinarán la cantidad de acondicionadores aplicados al lodo. Típicamente, la concentración de la soluciones de polímeros catiónicos es menor a 8,000 mg/l ó 0.8 % en peso cuando se preparan a partir de polímeros en polvo, y 40,000 mg/l ó 4 % en peso cuando se preparan a partir de una emulsión (WPCF, 1987).

Otro sistema importante para el apoyo de los filtros banda es el sistema de suministro de agua de lavado. Se requiere agua razonablemente libre de sólidos suspendidos, especialmente cuando se deshidratan lodos activados que tienden a obstruir los orificios del medio filtrante más rápidamente.

Es importante considerar también el sistema para el manejo de la torta de lodo; el equipo utilizado depende de la disposición del lugar, de las diferencias de altura, de la capacidad de almacenamiento, de la distancia a la que debe transportarse el lodo, etc. En el sistema más simple la torta se descarga directamente del filtro sobre un vehículo receptor para su transporte. Otros sistemas incluyen transportadores de bandas, transportadores de tornillo, bombas de cavidad progresiva, transportadores de cadenas y poleas, tolvas de almacenamiento, etc.

7.3.4 Consideraciones de diseño

Las consideraciones más importantes para el diseño de un proceso de deshidratación en filtros banda a presión son la capacidad del filtro y la eficiencia del acondicionamiento con polielectrolitos orgánicos.

La capacidad del filtro se determina con base en la carga hidráulica o la carga de sólidos dependiendo de la concentración de sólidos en la alimentación de lodo, obteniéndose la capacidad hidráulica y la capacidad para manejo de sólidos. La capacidad hidráulica del sistema es la capacidad para eliminar agua a través del lodo acondicionado en la zona de drenado por gravedad, mientras que la capacidad para manejo de sólidos se refiere al grado de compresión que es posible aplicar para obtener una torta suficientemente seca. Normalmente, la capacidad para el manejo de sólidos es un parámetro más crítico. La capacidad máxima del filtro por unidad de ancho de las bandas, tanto para carga hidráulica como de sólidos, puede alcanzarse únicamente con el acondicionamiento adecuado.

El caudal de lodo hacia el filtro banda es función de la tasa de extracción del lodo de los sistemas de tratamiento anteriores (digestores, sedimentadores, espesadores, etc.) y de la capacidad del sistema de bombeo asociado. Normalmente, la tasa de alimentación nominal al filtro por unidad de ancho de las bandas varía entre 3 y 4 l/m•s, aunque en ocasiones pueden operar eficientemente con tasas de alimentación de hasta el doble de dichos valores (WPCF, 1983).

El funcionamiento de la zona de alta presión es determinante para el correcto desempeño del proceso. Rubel y Hager, Inc (EPA, 1987) presentan un manual de diseño que contiene modelos matemáticos que describen diversos efectos en una zona de alta presión típica de un filtro banda a presión. A continuación se presentan algunas ecuaciones que pueden emplearse para calcular los parámetros siguientes:

- Presión en la torta de lodo debido al torque (fuerza requerida para transportar las bandas a través de la prensa):

$$P_1 = 2F_1/D = 152 \text{ HP}'/(D v) \quad (7.5)$$

donde:

- P_1 presión máxima en el lodo ocasionada por F_1 , kgf/cm^2
- F_1 fuerza ocasionada por el torque del sistema por cm de ancho de la banda, kgf/cm
- D diámetro del rodillo, cm
- HP' potencia de la transmisión por cm de ancho de la banda, HP/cm
- v velocidad de la banda, m/s

- Presión en la torta de lodo debida a la tensión en las bandas (para prensas que utilizan cilindros hidráulicos o neumáticos para tensionar las bandas):

$$P_2 = 2F_2/D + 2P \cos[a/(D W Y/2)] \quad (7.6)$$

donde:

- P_2 presión promedio en el lodo ocasionada por F_2 , kgf/cm^2
- F_2 fuerza ocasionada al tensionar las bandas por cm de ancho de la banda, kgf/cm
- P presión ocasionada al tensionar el rodillo impulsor, (esta fuerza es la que se aplica y puede ser medida fácilmente), kgf/cm^2
- a ángulo entre la fuerza resultante al tensionar la banda y el eje del rodillo

- D diámetro del rodillo, cm
- W ancho de la banda, cm
- Y ángulo que forma la banda alrededor del rodillo

- Presión en la torta de lodo debida a la elasticidad de la banda:

$$P_3 = 2F_3/D = 4eE/D^2 \quad (7.7)$$

donde:

- P_3 presión promedio en el lodo debida a F_3 , kgf/cm²
- F_3 fuerza debida a la elasticidad de la banda por cm de ancho, kgf/cm
- D diámetro del rodillo, cm
- E módulo de elasticidad de la banda (esfuerzo entre deformación), kgf
- e coeficiente de deformación

Los dos últimos parámetros pueden proporcionarlos las especificaciones del fabricante de las bandas.

- Presión total en la torta de lodo en cada rodillo:

$$\begin{aligned} P_T &= P_1 + P_2 + P_3 \\ &= 2[F_1 + F_2 + F_3]/D \end{aligned} \quad (7.8)$$

Con estas ecuaciones es posible calcular la presión total sobre la torta de lodo en cada rodillo para asegurar que ésta se incrementa gradualmente al pasar el lodo sucesivamente por cada rodillo. Estas ecuaciones también permiten determinar los diámetros de rodillos y flechas, que pueden compararse con las especificaciones del fabricante (EPA, 1987).

Otro aspecto determinante para la correcta operación del proceso es el sistema de alimentación del polímero. Por consiguiente, durante el diseño del proceso es importante optimizar la selección del polímero y la dosis apropiada de acuerdo con las características específicas del lodo. Debido a los altos costos de operación al llevar a cabo dicha optimización o la aplicación de múltiples polímeros, puede considerarse la posibilidad de instalar sistemas para el manejo de polímeros tanto

en forma líquida como secos, o cuando menos considerar espacio para futuras ampliaciones o la instalación de cualquiera de los dos sistemas (WPCF, 1983). La ubicación del sistema para el mezclado del lodo y polímero depende del tipo de lodo y de polímero, pero en cualquier caso es importante que el equipo sea flexible en cuanto a energía de mezclado, tiempo de retención y velocidad de entrada de la mezcla.

7.3.5 Factores de operación

Algunos de los factores más importantes que controlan la operación de un sistema de filtros banda a presión son los siguientes: tasa de alimentación de lodo, concentración de sólidos en la torta de lodo, tipo de lodo, dosis requerida de floculante para llevar a cabo el acondicionamiento y captura de sólidos (WPCF, 1987).

Un sistema de filtros banda debe estar diseñado para operar con la tasa de alimentación de lodo máxima y producir una torta que supere la concentración de sólidos mínima aceptable para dicha tasa de alimentación. Si la alimentación al sistema es menor que la tasa máxima puede obtenerse una torta de lodo más seca y, por el contrario, si la alimentación del sistema se encuentra por encima de ella, la concentración de sólidos en la torta de lodo será menor que la mínima aceptable. Esta relación inversa entre la tasa de alimentación y la concentración de sólidos en la torta se debe principalmente a la posibilidad de ajustar las bandas a velocidades bajas cuando las tasas de alimentación son menores, lo que permite proporcionar al lodo períodos de deshidratación más largos. Esto se aplica a todos los tipos de lodo (WPCF, 1987). Por otro lado, los filtros banda operan mejor cuando no se presentan fluctuaciones considerables en la concentración de sólidos en la alimentación de lodo (WPCF, 1983).

La máxima tasa de alimentación que el sistema puede manejar está determinada por la capacidad hidráulica y la capacidad para manejo de sólidos. En general, para lodos diluidos (concentración de sólidos $< 3\%$), la máxima tasa de alimentación que el filtro puede procesar para producir una torta de lodo suficientemente seca

está limitada por la capacidad del sistema para eliminar líquido por gravedad, es decir por su capacidad hidráulica. De otra forma, para lodos más concentrados, por ejemplo lodos tratados con cal, el factor que limita la producción de una torta con la concentración de sólidos deseada es la capacidad del sistema para manejo de sólidos.

TABLA 7.3 PRINCIPALES VARIABLES DE CONTROL DEL PROCESO Y SU EFECTO SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE FILTROS BANDA A PRESION (Adaptada de WPCF, 1987).

Variable de control	Parámetros principales que son afectados por la variable
Tasa de alimentación de lodo	Carga de sólidos al filtro, relación lodo/floculante y captura de sólidos
Velocidad de las bandas	Tiempo de retención en la zonas de drenado por gravedad y compresión
Tensión de las bandas	Fuerza aplicada durante la compresión
Permeabilidad de las bandas	Velocidad del paso del filtrado a través de la banda en la zona de drenado por gravedad y captura de sólidos
Velocidad del tambor rotatorio para facilitar el drenado (donde se aplique)	Tiempo de drenado por gravedad
Velocidad del tambor para la floculación o del agitador rotatorio	Energía de mezclado para el acondicionamiento del lodo
Tasa de alimentación del floculante	Acondicionamiento del lodo, relación lodo/floculante y captura de sólidos
Concentración de la solución de floculante	Acondicionamiento del lodo y relación lodo/floculante
Caudal del agua de dilución del floculante	Dispersión del floculante en las partículas sólidas del lodo

Otros parámetros importantes para evaluar la operación de un filtro banda son la dosis de floculante y la captura de sólidos. Es recomendable, siempre que sea posible, optimizar la dosis de polímero y su tasa de alimentación para el lodo que se trata. La captura de sólidos se define como el porcentaje de los sólidos alimentados que quedan finalmente en la torta. En general, para el mismo caudal de lodo adecuadamente acondicionado, el tipo de lodos con los que se obtienen

menores capturas de sólidos son los lodos difíciles de deshidratar como el exceso de lodos activados (WPCF, 1987).

La tabla 7.3 presenta datos de algunas variable de control en la operación de un sistema de filtros banda a presión y sus principales efectos.

7.3.6 Recomendaciones generales

A continuación se enlistan algunas recomendaciones para la selección del equipo y para la correcta operación de un sistema para la deshidratación de lodos mediante filtros banda a presión (EPA, 1987):

Equipo principal

- Que su estructura principal, rodillos y juntas estén contruidos de materiales durables y resistentes, adecuadamente recubiertos para evitar su corrosión;
- que utilice juntas cuya duración sea de cuando menos 100,000 hr;
- que utilice bandas de materiales durables, cuyo tejido de malla sea el apropiado para el tipo de lodo en cuestión;
- que los fabricantes, tanto del filtro como de las bandas, aseguren altos niveles de calidad;
- en la etapa de planeación del sistema, es recomendable que se consulten diversos fabricantes para obtener datos de diseño, funcionamiento del equipo y capacidad recomendada;
- confirmar los datos de rendimiento del equipo con otras instalaciones en operación y/o mediante pruebas a nivel piloto;
- adquirir todo el sistema de deshidratación con un solo proveedor para asegurar la integración del sistema.

Equipo auxiliar

- Es importante que el sistema cuente con un equipo que proporcione el mezclado adecuado al lodo antes de su alimentación al filtro, de manera que ésta sea más uniforme y continua;
- que el sistema de acondicionamiento sea suficientemente flexible en cuanto al tipo y puntos de aplicación de los polímeros;
- utilizar un sistema de bombeo de alta presión como bombas de cavidad progresiva o bombas de lóbulos;
- proporcionar ventilación suficiente para controlar la posible emisión y concentración de olores desagradables en el área de deshidratación.

Controles

- Es recomendable que el sistema cuente con la instrumentación necesaria para medir periódicamente parámetros de operación en todas las corrientes: alimentación de lodo, torta de lodo, filtrado y agua de lavado;
- que los controles de los sistemas auxiliares estén integrados a los del equipo principal y se conecten en la secuencia apropiada;
- que los controles se mantengan protegidos de ambientes corrosivos, humedad, temperatura, polvo, etc.

Seguridad

- que el sistema cuente con pasillos y pisos antiderrapantes;
- que la disposición considere un fácil acceso al equipo y controles;
- que el sistema cuente con equipo de seguridad, dispositivos de emergencia, etc.;
- que se asegure la instalación y mantenimiento de dispositivos para detener la operación del filtro y/o del equipo auxiliar en caso necesario;
- capacitar a los operarios para seguir precauciones y reglas de seguridad;
- llevar a cabo programas de capacitación y entrenamiento dirigidos a los operarios y personal técnico de la planta, para la correcta operación y mantenimiento de las instalaciones.

7.3.7 Operación y mantenimiento

Antes de iniciar la operación del sistema es importante revisarlo, especialmente la unidad misma de filtración, para detectar posibles deficiencias o la necesidad de darle mantenimiento. Deben revisarse las bombas para el suministro de agua de lavado y de la alimentación de lodo, el sistema de acondicionamiento, la lubricación de los rodillos, la alineación de las bandas, etc.

Una vez que se ha seleccionado el polímero y dosis adecuada para llevar a cabo el acondicionamiento, la secuencia al iniciar la operación del sistema en cada ciclo de deshidratación es normalmente la siguiente (WPCF, 1983):

1. Encender el sistema para el lavado de las bandas
2. Iniciar la operación de las bandas a presión, a una velocidad previamente seleccionada
3. Encender las bombas de alimentación de lodo
4. Comenzar la dosificación del agente acondicionador
5. Observar y probar el drenado del agua en la mezcla lodo-polímero; una vez que se alcance el nivel adecuado desviar hacia la prensa
6. Iniciar la operación del sistema para el manejo de la torta de lodo conforme se requiera
7. Hacer los ajustes finales necesarios.

Cuando el lodo comienza a distribuirse sobre una de las bandas a lo largo de la zona de drenado por gravedad, es necesario revisar nuevamente el sistema para cerciorarse de que la consistencia del lodo sea la apropiada, de acuerdo con la experiencia del operador en ciclos de deshidratación anteriores. También es el momento de hacer los ajustes más finos que sean necesarios, tanto en el filtro como en los sistemas auxiliares; algunos parámetros que deben considerarse para realizarlos son los siguientes:

7.3.7 Operación y mantenimiento

Antes de iniciar la operación del sistema es importante revisarlo, especialmente la unidad misma de filtración, para detectar posibles deficiencias o la necesidad de darle mantenimiento. Deben revisarse las bombas para el suministro de agua de lavado y de la alimentación de lodo, el sistema de acondicionamiento, la lubricación de los rodillos, la alineación de las bandas, etc.

Una vez que se ha seleccionado el polímero y dosis adecuada para llevar a cabo el acondicionamiento, la secuencia al iniciar la operación del sistema en cada ciclo de deshidratación es normalmente la siguiente (WPCF, 1983):

1. Encender el sistema para el lavado de las bandas
2. Iniciar la operación de las bandas a presión, a una velocidad previamente seleccionada
3. Encender las bombas de alimentación de lodo
4. Comenzar la dosificación del agente acondicionador
5. Observar y probar el drenado del agua en la mezcla lodo-polímero; una vez que se alcance el nivel adecuado desviar hacia la prensa
6. Iniciar la operación del sistema para el manejo de la torta de lodo conforme se requiera
7. Hacer los ajustes finales necesarios.

Cuando el lodo comienza a distribuirse sobre una de las bandas a lo largo de la zona de drenado por gravedad, es necesario revisar nuevamente el sistema para cerciorarse de que la consistencia del lodo sea la apropiada, de acuerdo con la experiencia del operador en ciclos de deshidratación anteriores. También es el momento de hacer los ajustes más finos que sean necesarios, tanto en el filtro como en los sistemas auxiliares; algunos parámetros que deben considerarse para realizarlos son los siguientes:

- La presión y suministro del agua de lavado, para asegurar que las bandas se limpien adecuadamente;
- la tasa de alimentación del polímero, para optimizar la floculación y, por consiguiente, la deshidratación;
- la velocidad de las bandas, para obtener un rendimiento de sólidos adecuado, así como para optimizar la descarga de la torta de lodo; y
- los controles automáticos, para asegurar su buen funcionamiento.

Una vez que se han hecho los ajustes necesarios, la operación del sistema puede continuar durante períodos de tiempo relativamente largos sin presentar variaciones considerables en la concentración de sólidos de la torta. Sin embargo, a pesar de que los filtros banda a presión, así como los subsistemas asociados, son razonablemente simples y seguros, el equipo debe revisarse y ajustarse periódicamente durante el transcurso de la jornada diaria de trabajo. Esta revisión debe incluir:

- La consistencia del lodo acondicionado, para verificar que la concentración de sólidos en la alimentación sea adecuada (usualmente entre 2 y 5%);
- la apariencia y humedad en la descarga de la torta de lodo, en comparación con ciclos anteriores;
- el sistema de inyección y alimentación del polímero, así como la floculación en el lodo, en comparación con características observadas previamente; y
- concentración de sólidos en el filtrado o claridad relativa (turbidez), para determinar si la dosis de polímero es la óptima.

Debido a la variabilidad de factores como la composición y características del lodo es necesario también observar y ajustar periódicamente algunos componentes del sistema para mejorar su operación e incrementar la concentración de sólidos en la torta de lodo. La optimización del proceso puede alcanzarse únicamente mediante un control riguroso de todas las partes del equipo.

Con respecto al mantenimiento, deben revisarse y seguirse las recomendaciones del fabricante, tanto del filtro como de los sistemas auxiliares. Es importante mantener lubricados los rodillos y demás partes móviles del sistema para evitar tener que reemplazarlos con frecuencia.

Los rodillos y cilindros deben revisarse cuidadosamente antes de iniciar cada ciclo de secado, o durante éste si se considera necesario. Para revisar que las bandas se mantengan en buenas condiciones es necesario que se encienda el sistema de manera que pasen una o dos veces alrededor de todos los rodillos y el operador pueda apreciar posibles irregularidades a lo largo de ambas bandas, incluyendo los bordes y las costuras, si las tienen.

El sistema de lavado debe revisarse para verificar que las salidas de agua no estén obstruídas, lo que reduciría la vida útil de las bandas por una limpieza deficiente. Debe revisarse también que la presión del agua de lavado sea la adecuada al tamaño de los orificios del sistema.

Los sistemas e interruptores eléctricos deben revisarse y probarse periódicamente. Si el tablero de los controles se encuentra expuesto a humedad excesiva o ambientes corrosivos es necesario inspeccionarlo también interiormente de vez en cuando para detectar posibles deterioros en las conexiones o contactos eléctricos, aún cuando las especificaciones del equipo aclaren que éste es resistente a dichos ambientes.

A través de un programa de mantenimiento preventivo bien establecido, se puede esperar que un sistema de filtros banda a presión funcione adecuadamente aún durante períodos superiores a su vida útil esperada y/o evitar costosas reparaciones.

8. DISPOSICION FINAL

Uno de los aspectos más importantes al establecer un tren de tratamiento de lodos es la selección del método de disposición final que se llevará a cabo, porque influye de manera importante en la determinación de las condiciones y características que debe presentar el lodo para poder disponerlo adecuadamente y, por consiguiente, en el tratamiento que requiere.

Una de las alternativas más convenientes para la disposición de lodos residuales de origen doméstico es su utilización como mejorador o acondicionador de suelos, principalmente agrícolas o forestales, ya que contienen algunos nutrientes importantes para el crecimiento y metabolismo de las plantas, tales como nitrógeno, fósforo y potasio, y proporcionan al suelo otras ventajas como porosidad, mayor capacidad para retener humedad, e incremento de la actividad biológica en el suelo entre otras. En la mayoría de los casos el acondicionamiento

de suelos con este tipo de lodos evita, o cuando menos reduce, la necesidad de aplicar fertilizantes químicos; sin embargo, es importante dar al lodo el tratamiento adecuado para evitar los problemas que puedan causar la presencia de microorganismos patógenos, larvas, ácaros, etc., la existencia de semillas indeseables o la presencia de metales pesados.

Otra alternativa importante consiste en su envío a un relleno sanitario, principalmente en combinación con otros residuos sólidos de origen doméstico. Este método de disposición ofrece menos restricciones que el anterior, principalmente con respecto a la acumulación en el suelo de sustancias tóxicas o indeseables. Algunos de los aspectos que requieren mayor atención al planear la disposición de lodos en relleno sanitario son la posibilidad de contaminar corrientes de agua subterráneas y la necesidad de deshidratar el lodo hasta una concentración de sólidos entre 20 y 30 % (Hernández Muñoz, 1990).

En este capítulo se describe la utilización de lodos residuales en el mejoramiento de suelos agrícolas y forestales, y su disposición en relleno sanitario.

8.1 Uso como mejorador de suelos

8.1.1 Características del sitio y consideraciones del suelo

Uno de los factores más importantes para favorecer un mejor aprovechamiento de los nutrientes presentes en el lodo, así como para evitar algunos problemas de operación es la selección adecuada del sitio al que se aplicará el lodo. Para ello es necesario considerar las condiciones del suelo y algunos aspectos físicos del terreno como la topografía, la profundidad de las corrientes subterráneas y la proximidad de cuerpos de agua superficiales.

Los suelos están formados por una mezcla de material orgánico e inorgánico, microorganismos, soluciones y espacios libres. La fracción inorgánica consiste principalmente de minerales arcillosos, silicatos, óxidos y carbonatos. La

proporción de las fracciones orgánica e inorgánica en el suelo son función de factores como el tiempo, clima, topografía, vegetación y material que dió origen al suelo, etc.

En el suelo se llevan a cabo una serie de transformaciones químicas y biológicas y sirve de soporte para la vegetación que utiliza los nutrientes presentes. Su capacidad de asimilación es función de la capacidad filtrar, amortiguar y absorber los materiales suspendidos y en solución que pasan a través de el suelo y de la permeabilidad de éste. Normalmente, en un suelo apropiado para el crecimiento de vegetación se encuentran proporciones volumétricas iguales de partículas sólidas y de espacios libres, siendo las condiciones óptimas cuando la mitad de los espacios libres son ocupados por agua y la otra mitad por aire (EPA, 1983).

La permeabilidad del suelo se refiere a la facilidad con la que el agua y el aire se mueven a través del suelo. En general, los suelos de textura fina presentan una permeabilidad mayor que los de textura gruesa. En este caso se prefiere que el suelo sea lo suficientemente permeable para permitir el intercambio de nutrientes presentes en el lodo y la vegetación.

La topografía del lugar influye en el movimiento de las corrientes superficiales y subterráneas, puede causar el escurrimiento del lodo aplicado (principalmente en forma líquida) y erosión en el suelo. También es importante conocer la pendiente del lugar para determinar si es factible o no la aplicación del lodo. La tabla 8.1 presenta recomendaciones para la aplicación de lodo líquido o deshidratado de acuerdo con la pendiente del terreno.

Con respecto a los mantos freáticos, es recomendable conocer su profundidad, tipo de agua y modelo probable de su movimiento, principalmente para prevenir su posible contacto con contaminantes presentes en el lodo. Generalmente, entre mayor sea la profundidad de estas corrientes de agua, el lugar es más apropiado para la aplicación de lodo. El espesor real del material sólido por encima del nivel de agua constituye la profundidad efectiva del suelo. La profundidad recomendada puede variar dependiendo de las características del lodo, la textura del suelo, el pH del suelo y el método y tasa de aplicación del lodo; sin embargo, generalmente se recomienda una profundidad mínima de 1 m para suelos agrícolas y 2 m para

suelos forestales cuando se trata de acuíferos de agua apropiada para beber, y 0.5 m y 0.7 m respectivamente para otro tipo de acuíferos (EPA, 1983).

Es importante también conocer la naturaleza, tamaño y número de los cuerpos de agua superficiales cercanos al sitio donde se planea aplicar el lodo, para prever su posible contaminación. La forma más común de contaminación es por escurrimiento del agua de lluvia que tiene contacto con el lodo. Sin embargo, es posible eliminar prácticamente esta posibilidad si se llevan a cabo las prácticas normalmente recomendadas para controlar la erosión y se selecciona apropiadamente el método de aplicación del lodo: aplicación superficial, inyección de lodo líquido o incorporación al suelo de lodo deshidratado (ver sección 8.1.5).

TABLA 8.1 RECOMENDACIONES PARA LA APLICACION DE LODO EN SUELOS CON DIFERENTES PENDIENTES (EPA, 1983).

Pendiente (en por ciento)	Comentarios
0 a 3	Pendiente ideal. Es posible aplicar lodo líquido o deshidratado sin problemas de escurrimiento o erosión
3 a 6	Pendiente aceptable. Existe un ligero riesgo de erosión. Es posible aplicar superficialmente el lodo líquido o deshidratado
6 a 12	Generalmente es recomendable la inyección del lodo líquido, excepto con un riguroso método para el control de escurrimientos. La aplicación superficial de lodo deshidratado es aceptable
12 a 15	No es recomendable la aplicación de lodo líquido. La aplicación superficial de lodo deshidratado es aceptable, pero se recomienda que se incorpore al suelo inmediatamente
> 15%	Únicamente es posible la aplicación de lodos deshidratados si el suelo es suficientemente permeable, y donde el área con esta pendiente es pequeña con respecto al área total

Las propiedades deseables en suelos a los que se aplica lodo son las siguientes (EPA, 1974):

- Profundidad suficiente;
- alta capacidad de percolación e infiltración;

- alta capacidad para la retención de agua y nutrientes;
- buena capacidad de drenado y aeración;
- pH neutro o alcalino.

8.1.2 Uso del lodo tratado como fertilizante y acondicionador de suelos

Las propiedades fertilizantes de los lodos residuales radican principalmente en su contenido de algunos elementos nutritivos esenciales para el crecimiento y metabolismo de vegetación, ya sean cultivos agrícolas o bosques. Los más importantes son el nitrógeno, fósforo y potasio. Sin embargo, la relación de potasio a nitrógeno y fósforo es generalmente menor que las necesidades de los cultivos, por lo que la aplicación de lodo a razón de las necesidades de nitrógeno no proporciona suficiente potasio.

Además de su valor fertilizante, la aplicación de lodo mejora la calidad de suelos de textura fina al aumentar su porosidad, facilitando el crecimiento de las raíces y la circulación de aire y agua, y también mejora la calidad de suelos arenosos de textura gruesa porque incrementa su capacidad para retener líquidos y favorece los fenómenos de adsorción e intercambio de nutrientes.

Por otra parte, una de las limitantes más importantes para la aplicación de lodo es la posible contaminación con nitratos de los mantos freáticos, los cuales son generalmente fuente de abastecimiento de agua potable.

Después de la aplicación del lodo, se llevan a cabo reacciones de nitrificación del nitrógeno amoniacal aplicado en el lodo o liberado durante la descomposición de nitrógeno orgánico para producir nitratos. Los nitratos son aniones solubles en agua que son fácilmente transportados hacia las corrientes subterráneas. Si se suministra al suelo una cantidad excesiva de nitrógeno, ya sea en forma de fertilizantes, lodo, desechos de animales, u otros materiales, es muy probable que el líquido que se filtra a través del suelo contenga una concentración excesiva de nitratos y existe un riesgo importante de contaminar las corrientes de aguas subterráneas. Se ha establecido que concentraciones de nitratos en las fuentes de

suministro de agua mayores de $10 \text{ mg NO}_3^- \text{N/l}$ pueden ser tóxicas para niños y el ganado (EPA, 1983).

La infiltración de nitratos se minimiza si el lodo se aplica de acuerdo con los requerimientos de nitrógeno del cultivo. Algunos factores importantes que determinan la concentración crítica de nitrógeno aplicado en el lodo son los siguientes: tipo de suelo, geología, clima, tipo de vegetación, y manejos agrícolas o forestales, por lo que deben llevarse a cabo cuidadosos cálculos de cualquier sistema propuesto de acuerdo con las condiciones locales específicas.

Otros constituyentes en el lodo que limitan y pueden determinar las tasas de su aplicación a la tierra son el contenido de organismos patógenos y las trazas de metales pesados. Estos constituyentes, al igual que el fósforo y material orgánico que se aplican en el lodo, se mantienen generalmente entre 15 y 30 cm de la superficie del suelo y no representan riesgos importantes de contaminación de corrientes subterráneas. El movimiento de los metales se reduce aún más si el pH del suelo se mantiene por encima de 6.5, como comúnmente se requiere para minimizar que las plantas consuman estos metales (EPA, 1983).

El control de patógenos es muy importante por el posible contacto directo con lodo durante su manejo y aplicación e indirectamente a través del consumo de productos involucrados en la cadena alimenticia del hombre. Como se mencionó en capítulos anteriores, la estabilización de lodos no destruye totalmente los organismos patógenos presentes en ellos, pero reduce la cantidad presente considerablemente, por lo que es muy importante que cualquier lodo que se aplique sobre terrenos sea correctamente estabilizado por cualquiera de los métodos mencionados.

El almacenaje de lodos por períodos prolongados es también uno de los métodos más simples para reducir los coliformes fecales en un 99.9%, aunque algunos parásitos persisten mucho más tiempo del que normalmente se almacenan los lodos en lagunas. La mayoría de las comunidades que disponen lodos por este método lo almacenan en lagunas para dar flexibilidad necesaria, de acuerdo con el período de aplicación de lodo. El acceso a estas lagunas debe restringirse totalmente.

La viabilidad de los microorganismos patógenos puede variar ampliamente desde pocas horas hasta varios meses. Entre los factores que influyen en la supervivencia de los patógenos en el suelo y la vegetación se encuentran los siguientes:

- Tipo de organismo;
- temperatura;
- humedad: a mayor humedad mayor viabilidad;
- tipo de suelo: los suelos con pH neutro y alta capacidad para retener agua favorecen su supervivencia;
- materia orgánica: el tipo y cantidad de materia orgánica presente puede servir como alimento o fuente de energía para los microorganismos, aumentando su viabilidad.

El potencial de contaminación de aguas subterráneas por microorganismos patógenos depende de su capacidad para sobrevivir y moverse a través del suelo, lo que a su vez depende de otros parámetros como: tipo de suelo, cantidad de microorganismos aplicados a la superficie, variedad de microorganismos contenidos tanto en el suelo como en el lodo aplicado. Generalmente, no se considera un riesgo potencial tan importante la contaminación de las corrientes subterráneas por organismo patógenos, como la contaminación de aguas superficiales por medio una excesiva erosión superficial y/o escurrimiento directo ocasionado por precipitaciones pluviales.

El contenido de metales en el lodo puede variar ampliamente dependiendo principalmente de su concentración en el agua residual. Los metales presentes en mayor concentración son generalmente el zinc, cobre, níquel, cadmio y plomo. El zinc y el cobre son micronutrientes que pueden mejorar la calidad del cultivo cuando el lodo se aplica en cantidad apropiada.

Existe la teoría de que el contenido de metales pesados es función de la cantidad de desechos industriales que son descargados a las aguas residuales y que los lodos de plantas de tratamiento que no reciben grandes cantidades de aguas residuales industriales están prácticamente libres de metales pesados. Desafortunadamente, el análisis de lodos de diferentes plantas para tratamiento de aguas residuales de origen predominantemente doméstico en algunas ciudades de Estados Unidos indican que éstos contienen concentraciones significativas de

metales pesados (EPA, 1983). Antes de disponer el lodo de esta forma es importante efectuar análisis de concentración de metales pesados en el influente a la planta de tratamiento. De encontrarse altas concentraciones de metales pesados es necesario llevar a cabo algunos procesos para su eliminación, o bien planear otra forma de disposición final.

Es difícil establecer con precisión los niveles permisibles de dichos elementos tóxicos en suelos, debido a diversos factores de los diferentes tipos de suelo, la variedad de especies de plantas de cultivo y su tolerancia a cada uno de ellos. Por consiguiente es difícil establecer el riesgo de contaminación que representa este método de disposición. La toxicidad de ciertos elementos a las plantas se presenta con mayor facilidad cuando el lodo se aplica a suelos ácidos. La cantidad de lodo que puede aplicarse sin riesgo depende de la composición del lodo, de la clase de suelo y de las especies que se cultivarán en él.

Por otra parte, es importante considerar que casi la mitad del nitrógeno y potasio en el lodo digerido se encuentra en fase líquida, por lo que para estos fines es necesario valorar cuidadosamente las ventajas de la deshidratación del lodo para determinar si es conveniente llevarla a cabo, aún cuando representa pérdidas significativas en su contenido de material fertilizante. Asimismo para favorecer un buen diseño de la aplicación del lodo es necesario conocer los siguientes datos de su composición:

- Sólidos totales;
- nitrógeno total;
- nitrógeno amoniacal;
- nitratos;
- fósforo total;
- potasio total;
- metales pesados: Pb, Zn, Cu, Ni, Cd

Es necesario establecer también un programa de muestreo y análisis del suelo para determinar la acumulación de los metales pesados, los requerimientos de fertilizante adicional y evaluar el pH del suelo para determinar si es necesario aplicar cal para elevarlo. Los análisis del suelo deben incluir también el fósforo y potasio disponible para el consumo de las plantas y la capacidad de intercambio

catiónico. Estos datos, junto con los datos del lodo y del cultivo, permiten llevar a cabo cálculos de la tasa anual de aplicación del lodo y la vida útil del sitio.

Se le llama capacidad de intercambio catiónico a la cantidad de iones positivos (cationes) que pueden ser retenidos por suelos con moléculas cargadas negativamente, generalmente minerales arcillosos, por fuerzas electrostáticas. La medida común de este parámetro es miliequivalente de partículas cargadas por 100 g de suelo seco.

La cantidad de fósforo y potasio disponible para el consumo de la vegetación se determina normalmente analizando la remoción de estos elementos del suelo por medio de extracción con ácido diluido o una solución de bicarbonato (EPA, 1983). El fósforo normalmente se encuentra en el suelo en forma de algunas especies insolubles, mientras que el potasio se encuentra generalmente en solución.

8.1.3 Aplicación en suelos agrícolas

La aplicación de lodos a suelos agrícolas normalmente se lleva a cabo anualmente y puede ser uno de los métodos de disposición final más simples y económicos; sin embargo, es de primordial importancia considerar los riesgos a la salud humana que puede causar el consumo de sustancias tóxicas por medio del cultivo. Algunas limitantes para llevarla a cabo son: la presencia de metales pesados, la presencia de microorganismos patógenos, la falta de tierras agrícolas cercanas a la planta para tratamiento de aguas y en ocasiones la resistencia del público. Sin embargo, la popularidad de este método ha aumentado considerablemente en países que practican comúnmente el tratamiento de lodos (EPA, 1983).

En este caso, al igual que otras formas de disposición en tierra, es importante y necesario que los lodos sean bien estabilizados, principalmente por el riesgo que representa el cultivo de productos involucrados en la cadena alimenticia del hombre. Por otro lado, algunos microorganismos patógenos pueden sobrevivir en el lodo después de la estabilización, permanecer vivos en el suelo por períodos superiores a varios meses después de su aplicación, y contaminar frutas y

vegetales que se cultiven en dichos suelos. Una manera de reducir este riesgo es evitar la aplicación de lodos líquidos a tierras agrícolas para el cultivo de raíces o vegetales para consumo humano que se coman crudos (EPA, 1983). Asimismo, deben tomarse algunas precauciones adicionales como las siguientes:

- Debe controlarse el acceso al sitio durante los 12 meses siguientes a la aplicación del lodo;
- no debe permitirse el acceso a animales para que pasten en el sitio durante el primer mes posterior a la aplicación del lodo, sobre todo si se trata de animales para consumo humano;
- no deben cultivarse raíces ni vegetales que se consuman crudos durante los 18 meses siguientes a la aplicación del lodo, a menos que éste haya sido desinfectado.

La aplicación del lodo debe planearse de acuerdo con los principios agrícolas y agronómicos establecidos, de manera que no represente más riesgo que las prácticas comunes, como la aplicación de fertilizantes. La tasa de aplicación normalmente se determina con base en los requerimientos de nitrógeno o fósforo para el desarrollo del cultivo, las recomendaciones para aplicación de fertilizantes y la acumulación anual y total de metales pesados en el suelo.

El cadmio es uno de los metales pesados que pueden estar presentes en el lodo, al que hay que darle mayor importancia con respecto a su toxicidad para el ser humano. Este metal es asimilado por gran parte de los vegetales y, si se consume en elevadas concentraciones, se acumula fácilmente en los riñones y puede causar enfermedades crónicas como proteinuria, que es la deficiencia de proteínas ocasionada por su excesiva excreción en la orina. Aunque es difícil establecer con precisión el efecto que el cadmio presente en el lodo causa en el hombre, es necesario limitar su aplicación considerando que cada cultivo presenta diferente grado de asimilación (por ejemplo, los vegetales asimilan considerablemente más cadmio que los cereales y leguminosas), y la influencia de otros factores como las propiedades del suelo, capacidad de intercambio catiónico y cantidad de cadmio aplicado. La tabla 8.2 presenta la asimilación relativa de cadmio de diferentes cultivos agrícolas.

TABLA 8.2 ASIMILACION Y ACUMULACION RELATIVA DE CADMIO EN LA PARTE COMESTIBLE DE DIFERENTES CULTIVOS (EPA, 1983).

Alta	Moderada	Baja	Muy baja
lechuga	col	calabaza	ejote
espinaca	betabel	maíz	leguminosas
acelgas	nabos	brócoli	cereales
mastuerzo	rábanos	coliflor	pimienta
hojas de nabo	mostaza	col de Bruselas	frutas tropicales como: melón, piña, sandía, etc.
hojas de betabel	papa	apio	árboles frutales
zabahoria	cebolla	infrutaciones como: fresas, moras, zarzamoras, etc.	jitomate

Por otra parte, el exceso de cadmio en el suelo puede causar una reducción en el rendimiento del cultivo (fitotoxicidad), pero generalmente las concentraciones del metal que no representan efectos adversos para la salud del hombre se encuentran muy por debajo de los niveles de fitotoxicidad, es decir, si se limita la aplicación de cadmio de acuerdo con el riesgo a la salud humana es muy poco probable que el metal sea tóxico para el cultivo.

La cantidad máxima de cadmio que se recomienda aplicar al suelo anualmente depende principalmente del tipo de cultivo, por ejemplo, para aquellos que presentan una asimilación alta o moderada de cadmio se recomienda un límite anual de $0.05 \text{ kg}/1000 \text{ m}^3 \cdot \text{año}$, para los que presentan asimilación baja o muy baja $0.056 \text{ kg}/1000 \text{ m}^3 \cdot \text{año}$, y para los cultivos para consumo anual no se establece un límite anual (Reed *et al*, 1988).

Además del cadmio, la acumulación en el suelo de otros metales pesados como el plomo, zinc, cobre y níquel puede limitar el número de años que puede aplicarse el lodo en el sitio, principalmente para establecer la productividad del suelo. La tabla 8.3 presenta los límites recomendados para la acumulación de estos metales en función de la capacidad de intercambio catiónico, que es un indicador de la relación

entre la cantidad total de metales aplicados y la capacidad del suelo para controlar el consumo que hacen de ellos las plantas.

Normalmente, el plomo no es asimilado por las plantas, pero puede ser ingerido directamente por los animales que pasten en el lugar, ya que la aplicación superficial del lodo permite que parte de éste quede adherido al follaje. De otra forma, el zinc, cobre y níquel si son asimilados por la vegetación y si se aplican en cantidades excesivas pueden reducir el rendimiento del cultivo, lo que generalmente sucede antes de que la concentración de estos metales represente riesgo para la salud del hombre. Para reducir la movilidad de los metales pesados en el suelo es importante que el pH del suelo se mantenga por encima de 6.5.

TABLA 8.3 LIMITES RECOMENDADOS PARA LA ACUMULACION DE METALES PESADOS EN SUELOS AGRICOLAS DEBIDO A LA APLICACION DE LODOS RESIDUALES EN FUNCION DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO DEL SUELO (EPA, 1983).

Metal	Máxima acumulación, kg/1000 m ²		
	Capacidad de intercambio catiónico del suelo, meq/100 g ^a		
	< 5	5 a 15	> 15
Plomo	56	112	224
Zinc	28	56	112
Cobre	14	28	56
Níquel	14	28	56
Cadmio	0.5	10	20

^a El pH del suelo debe mantenerse por encima de 6.5

Para establecer la carga límite de lodo, ya sea anual o acumulativamente, con respecto a la concentración de metales puede emplearse la ecuación siguiente:

$$R_m = (K_m L_m) / C_m \quad (8.1)$$

donde:

R_m tasa de aplicación de lodo limitada por la presencia de metales pesados, ton métrica/1000 m³

K_m	0.001, factor de conversión (sistema métrico)
L_m	carga límite del metal en el intervalo seleccionado, $\text{kg}/1000 \text{ m}^3$
C_m	contenido del metal en el lodo, como fracción decimal, (por ejemplo, para un lodo con 50 ppm de cadmio, $C_m = 0.00005$)

Por otra lado, para establecer la tasa de aplicación de lodo con respecto a los requerimientos de nitrógeno del cultivo es necesario considerar el método de aplicación del lodo y la cantidad de nitrógeno disponible en sus diversas formas: nitratos, nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico. Por ejemplo, si el lodo se aplica superficialmente en forma líquida, se volatiliza aproximadamente la mitad del nitrógeno amoniacal presente en el lodo, pero si se incorpora inmediatamente al suelo o si se aplica lodo deshidratado, se considera que el 100% del nitrógeno amoniacal aplicado se encuentra disponible. Debe considerarse también que la mineralización del nitrógeno orgánico remanente de la aplicación de lodo en años anteriores contribuye a la cantidad total de nitrógeno disponible para el cultivo, principalmente durante los primeros años siguientes a la aplicación del lodo. La cantidad de nitrógeno disponible en el primer año de aplicación del lodo puede calcularse mediante la ecuación siguiente:

$$N_d = K[\text{NO}_3 + k_v(\text{N-NH}_3) + f_n(\text{N-org})] \quad (8.2)$$

donde:

N_d	cantidad de nitrógeno disponible para el cultivo durante la aplicación anual, kg/ton sólidos secos
K	301, factor de conversión (sistema métrico)
NO_3	concentración de nitratos en el lodo, fracción decimal
k_v	factor de volatilización; 0.5 para aplicación superficial de lodo líquido, 1.0 para inyección o incorporación del lodo líquido y lodo deshidratado aplicado en cualquier forma
N-NH_3	concentración de nitrógeno amoniacal, fracción decimal
f_n	factor de mineralización, ver tabla 8.4
N-org	concentración de nitrógeno orgánico en el lodo, fracción decimal

Mientras que el nitrógeno disponible en el año n , a partir de la mineralización del nitrógeno orgánico aplicado en años anteriores, se calcula mediante la ecuación 8.3:

$$N_n = K[f_2(N\text{-org})_2 + f_3(N\text{-org})_3 + \dots + f_n(N\text{-org})_n] \quad (8.3)$$

donde:

N_n cantidad de nitrógeno disponible a partir de la mineralización, kg/ton de sólidos secos

$(N\text{-org})_n$ fracción decimal del nitrógeno orgánico remanente en el año n

TABLA 8.4 RAPIDEZ DE MINERALIZACION DEL NITROGENO ORGANICO APLICADO AL SUELO POR MEDIO DE LODOS DE AGUAS RESIDUALES (Reed *et al*, 1988).

Tiempo después de la aplicación del lodo, años	Mineralización, %		
	lodo crudo	lodo digerido	composta
1	40	20	10
2	20	10	5
3	10	5	3
4	5	3	3
5	3	3	3
6	3	3	3
7	3	3	3
8	3	3	3
9	3	3	3
10	3	3	3

La carga anual de lodo con respecto a los requerimientos de nitrógeno se calcula con base en el nitrógeno disponible de acuerdo con la ecuación siguiente:

$$R_N = C_N / (N_d + N_n) \quad (8.4)$$

donde:

R_N carga anual de lodo para un año determinado, ton/1000 m³

C_N consumo anual de nitrógeno por el cultivo, kg/1000 m³

Los requerimientos de nitrógeno dependen de cada especie y pueden variar ampliamente en un intervalo entre 5 y 35 kg de N/1000 m² por año (EPA, 1983). Esto normalmente equivale a entre 10 y 40 m³ de lodo/1000 m², si el lodo se

aplica en forma líquida con una concentración de sólidos de aproximadamente 5%. La tabla 8.5 presenta el consumo anual de los nutrientes más importantes presentes en los lodos residuales municipales por diferentes cultivos.

TABLA 8.5 RAPIDEZ DE CONSUMO DE NUTRIENTES POR ALGUNOS CULTIVOS AGRICOLAS (Adaptada de Reed *et al*, 1988).

Cultivo	Nutriente, kg/1000 m ³ año		
	N	P	K
alfalfa	22.5 - 67.5	2.2 - 3.4	17.4 - 22.4
cebada	12.5 - 16.0	1.5 - 2.5	2.0 - 12.0
maíz	17.5 - 25.0	2.0 - 4.0	11.0 - 20.0
algodón	7.5 - 18.0	1.5 - 2.8	4.0 - 10.0
sorgo	13.5 - 25.0	1.5 - 4.0	7.0 - 17.0
avena	11.5	1.7	12.0
papa	23.0	2.0	24.5 - 32.5
arroz	11.0	2.6	12.5
frijol	25.0 - 32.5	1.0 - 2.8	3.0 - 12.0
trigo	16.0 - 17.5	1.5 - 3.0	2.0 - 16.0
betabel	25.5	2.6	45.0

Como se puede observar en la tabla 8.5 los requerimientos de fósforo son mucho menores a los de nitrógeno, y algunas veces se aplica el lodo con base en los requerimientos de fósforo para evitar aplicar un exceso de nitrógeno. Por supuesto que los requerimientos de nitrógeno no se satisfacen y algunas veces es recomendable aplicar fertilizante adicionales. La tasa de aplicación de lodo de acuerdo con las necesidades de fósforo puede calcularse mediante una ecuación similar a la ecuación 8.1:

$$R_p = (K_p U_p) / C_p \quad (8.5)$$

donde:

- R_p tasa de aplicación de lodo de acuerdo con los requerimientos de fósforo considerando que el 50% del fósforo total presente en el lodo se encuentra disponible para el cultivo, ton/1000 m²
- K_p 0.002, factor de conversión (sistema métrico)
- U_p consumo anual de fósforo, kg/1000 m²
- C_p concentración de fósforo total en el lodo, fracción decimal

El área requerida para la disposición del lodo puede estimarse con la cantidad total de los residuos por disponer y la tasa de aplicación del lodo del factor limitante, ya sea anual o acumulativamente. Esta se refiere al menor valor obtenido al resolver las ecuaciones 8.1, 8.4 y 8.5.

8.1.4 Aplicación en suelos forestales

La aplicación de lodos a tierras forestales no ha sido tan empleada como la aplicación a tierras agrícolas; sin embargo, los lodos residuales ofrecen grandes oportunidades para mejorar la fertilidad de los bosques y acelerar notablemente el crecimiento de los árboles (entre un 200 y 300%).

A diferencia de la utilización del lodo para mejorar suelos agrícolas, en este caso se aplica una mayor cantidad de lodo a intervalos mayores (entre 3 y 5 años) o en una sola aplicación, y es necesario restringir el acceso del público al sitio durante los 12 meses siguientes a la aplicación de lodo líquido. Generalmente, las restricciones en cuanto a presencia de metales pesados son menores debido a que las especies forestales no se involucran en la cadena alimenticia del hombre, por esto aunque los suelos forestales son típicamente más ácidos que los suelos agrícolas (pH de 5.5 o menor), no es necesario elevar el pH y mantenerlo por encima de 6.5. Por otro lado, se ha demostrado que el aumento en la concentración de metales disponibles para ser asimilados por la vegetación forestal (ocasionado por el pH bajo) no causa problemas de fitotoxicidad a la mayoría de las especies forestales (EPA, 1983).

Algunos criterios de diseño muy estrictos establecen que el límite máximo de acumulación de metales en el suelo, con excepción del cadmio, debe considerarse el mismo que para suelos agrícolas con capacidad de intercambio catiónico entre 5 y 15 meq/100 g, con la diferencia de que en este caso no es necesario mantener el pH por encima de 6.5 (Reed *et al*, 1988). La tabla 8.6 reproduce dichos valores. No hay restricciones para la acumulación de cadmio debido a que la mayor parte de los productos forestales no son comestibles y el mayor riesgo que representa

radica en su toxicidad para el ser humano a través del consumo de alimentos con altas concentraciones del metal.

TABLA 8.6 LIMITES RECOMENDADOS PARA LA ACUMULACION DE METALES PESADOS EN SUELOS FORESTALES, (Reed *et al*, 1988).

Metal	Cargas acumulativas máximas, kg/ 1000m ²
Plomo	112.0
Zinc	56.0
Cobre	28.0
Niquel	28.0
Cadmio	no hay restricción

Asimismo se ha determinado que el consumo de nutrientes en las especies forestales es normalmente menor que el de productos agrícolas y que el consumo de nitrógeno no solo difiere entre las diferente especies, sino también entre las diferentes edades de una misma especie: Las plantaciones recientes (hasta 5 años) consumen nitrógeno con menor velocidad, los árboles en etapa de crecimiento vigoroso (5 - 15 años o más, dependiendo de la especie) presentan la mayor tasa de consumo de nitrógeno y los bosques establecidos que presentan una tasa de consumo de nitrógeno intermedia. El promedio anual de consumo de nitrógeno por especies forestales se encuentra entre 10 y 40 kg/ 1000 m² (EPA, 1983).

Por otra parte, en los ecosistemas forestales gran parte del nitrógeno consumido por los árboles es regresado al suelo por medio de las hojas que caen, por lo que el consumo neto de nitrógeno puede ser reducido entre un 5 y 50 %.

El acelerado crecimiento de los árboles, resultado de la aplicación de lodo, puede modificar las características básicas y calidad de la madera. Algunas investigaciones recientes indican que pueden ocurrir efectos tanto positivos como negativos, pero que los efectos combinados normalmente se equilibran, de manera que no se presentan cambios significativos entre la madera de árboles desarrollados en suelos acondicionados o no con lodos residuales (EPA, 1983).

8.1.5 Manejo, transporte y aplicación del lodo

Algunas de las consideraciones más importantes cuando se planea la disposición de lodo sobre tierras agrícolas o forestales son la cantidad de lodo por disponer y la flexibilidad que debe darse al sistema para operar de acuerdo con el programa o calendario de aplicación. Es recomendable que se cuente con instalaciones para el almacenamiento de lodo cerca del sitio donde debe ser aplicado o de la planta para tratamiento, o bien que se consideren métodos de disposición alternativos durante las temporadas en las que no es recomendable la aplicación de lodo sobre dichos tipos de suelo. Adicionalmente, es importante tener en cuenta que el almacenaje de lodos proporciona cierto grado de estabilización, ya que disminuye la población de microorganismos patógenos.

El transporte del lodo puede efectuarse en carros tanque, rieles, tubería, o camiones de volteo, dependiendo de las características físicas del lodo, diferencias de elevación, distancia por recorrer, volumen de lodo, y disponibilidad de la tierra. Por ejemplo, los carros tanque proporcionan flexibilidad en la selección de los sitios de disposición y son ampliamente utilizados para transportar y aplicar lodo líquido, pero el costo por unidad de distancia es relativamente alto, por lo que se recomiendan cuando las distancias por recorrer son cortas. En el caso de transporte mediante tuberías es importante asegurar la viabilidad de la tierra durante un período de tiempo suficiente para justificar la inversión de altos costos capitales contra bajos costos de operación.

El lodo puede ser aplicado mediante tres métodos principales: aplicación superficial, incorporación al suelo e inyección al subsuelo. Por cualquiera de los métodos el lodo eventualmente se incorpora al suelo, ya sea inmediatamente por medio mecánicos, o a largo plazo por medios naturales.

La aplicación superficial puede llevarse a cabo con lodo líquido o lodo deshidratado. En el caso de lodo líquido, se utilizan las técnicas comunes de irrigación, como irrigación por aspersión, irrigación por cresta y surcos, etc. (EPA, 1974).

El método de incorporación al suelo se lleva a cabo mezclando mecánicamente el lodo deshidratado con el suelo. Ofrece algunas ventajas como la eliminación de malos olores, la posible contaminación de aguas superficiales mediante escurrimientos, así como otros problemas que resulten de las técnicas de irrigación.

La inyección al subsuelo ofrece prácticamente las mismas ventajas que el método de incorporación de lodo deshidratado, además de que se reducen las pérdidas de nitrógeno por la volatilización de amoníaco; sin embargo es más difícil lograr una distribución uniforme del lodo y es el método más caro, principalmente por el alto consumo de energía.

8.2 Relleno Sanitario

El relleno sanitario ha sido una de las alternativas más empleadas para disponer lodos de aguas residuales desde que comenzó a considerarse la importancia de su tratamiento y disposición a principios de siglo en Europa y Estados Unidos.

Este método consiste fundamentalmente en depositar los residuos en una excavación, compactarlos con equipo mecánico y cubrirlos posteriormente con tierra. Inicialmente, se llevaba a cabo aplicando el lodo en forma líquida con una concentración de sólidos de 5% aproximadamente, pero estudios posteriores indicaron que es más conveniente deshidratar previamente el lodo hasta una concentración de sólidos entre 20 y 30% para prevenir que se infiltre una cantidad excesiva de líquido al subsuelo (Brunner y Lichtensteiger, 1987). Actualmente, la práctica más común consiste en deshidratar por medios mecánicos el lodo digerido, o bien deshidratarlo y mezclarlo posteriormente con cal, antes de enviarlo a un relleno sanitario para su disposición, ya sea solo o mezclado con otros desechos sólidos de origen doméstico.

Otra alternativa consiste en utilizar el lodo tratado con cal como cubierta final de rellenos sanitarios de otros residuos sólidos (Balmér, 1987).

En general, en la mayoría de los países que practican el relleno sanitario de lodos residuales existen mucho menos restricciones para este método de disposición que para otras formas de disposición en tierra, principalmente en cuanto a su composición química, por ejemplo, presencia de metales pesados, trazas de sustancias orgánicas, etc. En algunos casos existen guías y recomendaciones para asegurar la estabilidad geotécnica del relleno, que usualmente establecen un límite máximo de humedad (Brunner y Lichtensteiger, 1987).

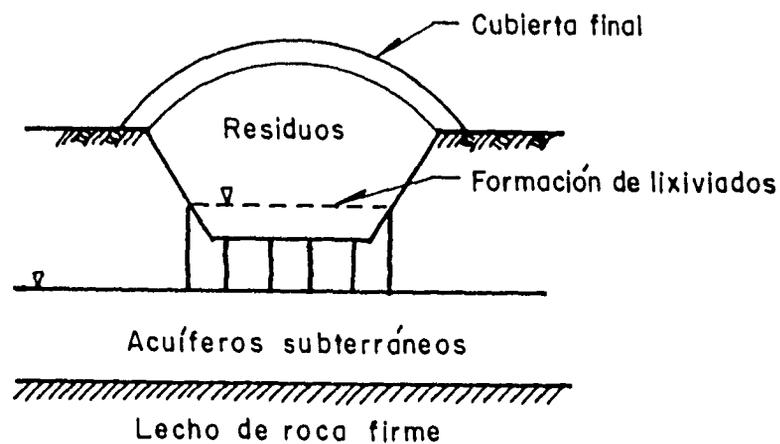


Fig. 8.1 Relleno sanitario de atenuación natural, típico para residuos de origen doméstico (Bagchi, 1990)

El sitio destinado para un relleno sanitario debe estar alejado de acuíferos naturales, pozos para suministro de agua, presas, carreteras, zonas densamente pobladas, etc. y, de preferencia, donde el suelo no sea excesivamente permeable (Bagchi, 1990). En los rellenos sanitarios para residuos de origen doméstico generalmente se permite que el agua se filtre a través de los desechos y del suelo hacia los mantos freáticos, sin la necesidad de instalar drenajes o sistemas

colectores de líquido (ver figura 8.1). A este tipo de rellenos se les llama "de atenuación natural" y al líquido que se infiltra a través de los residuos, bien sea agua de lluvia o el agua que forma parte del residuo (como en el caso de los lodos), se le llama lixiviado.

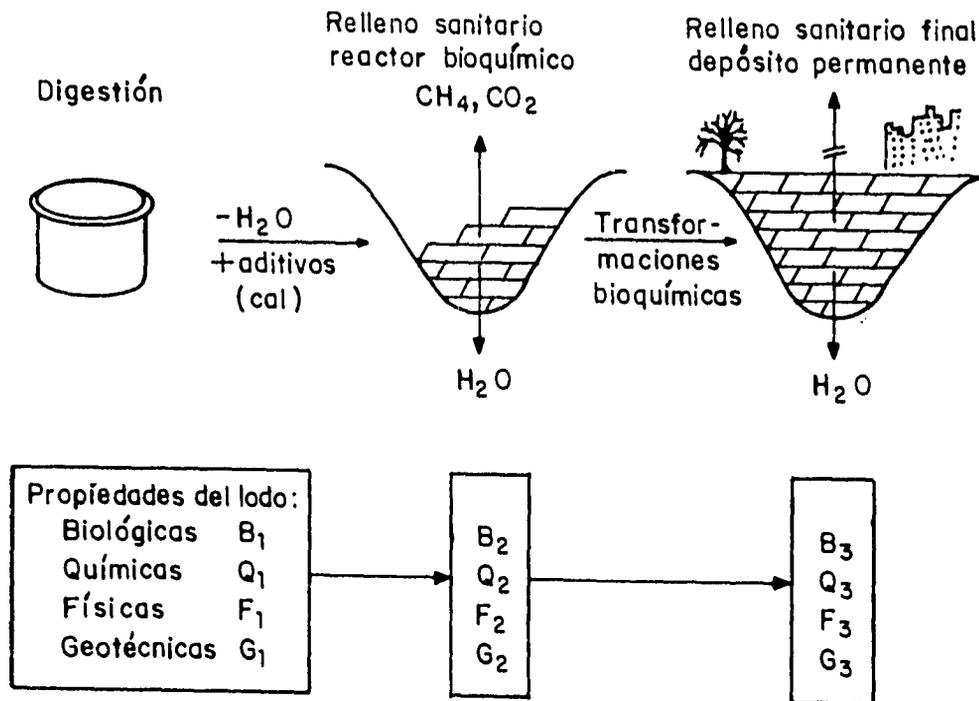


Fig. 8.2 Ruta posible para el lodo digerido al relleno sanitario como almacenamiento final.

En la mayoría de los rellenos sanitarios el lixiviado acarrea consigo material orgánico e inorgánico, disuelto y/o en suspensión; algunos constituyentes que se encuentran en mayor porcentaje en lixiviados generados en rellenos sanitarios que operan con residuos de origen doméstico son los siguientes (Morales, 1988):

- Hierro (principalmente óxidos);
- cloruros;
- nitrógeno orgánico;
- fósforo (fosfatos);
- sulfatos;
- trazas de metales pesados;
- sólidos suspendidos;

- material orgánico medido como DBO y/o DQO;
- carbono orgánico total.

El relleno sanitario de lodos normalmente funciona como un depósito permanente; sin embargo, en ocasiones se emplea un relleno sanitario temporal que actúa como reactor bioquímico antes de alcanzar una etapa de almacenamiento final, como lo muestra la figura 8.2. Dicha etapa es aquella en la que un relleno sanitario que contiene material con posibilidad de filtrarse, no se considera peligroso a largo plazo para el medio ambiente (Lichtensteiger y Brunner, 1989).

8.2.1 Consideraciones previas

Algunas de las consideraciones más importantes cuando se planea la disposición de lodos en relleno sanitario, principalmente para establecer el tratamiento previo que requieren, son las siguientes: aspectos físicos y bioquímicos del lodo, aspectos legales, las relaciones con el medio ambiente y la estabilidad del lodo en el depósito. Normalmente, se recomienda que el lodo sea estabilizado y deshidratado antes de que se envíe al relleno sanitario.

Los criterios para evaluar la estabilidad de un relleno sanitario se relacionan con parámetros que indiquen las características físicas, químicas, biológicas y la estabilidad geotécnica del sistema. Algunos de ellos son: el esfuerzo cortante, valor calorífico, contenido de agua, densidad, textura, contenido de material orgánico, pH, concentración de algunos elementos como carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno y cloro, concentración de metales pesados, etc. (Lichtensteiger y Brunner, 1989).

En un relleno sanitario, el alto contenido de agua presente en los lodos residuales afecta la mecánica del suelo y las condiciones hidrológicas del sistema. La experiencia indica que es recomendable manejar el lodo con una concentración de sólidos superior a 30 %, lo que hace necesaria su deshidratación mecánica, después de su acondicionamiento con cal y sales de hierro o con polielectrolitos orgánicos. Si por el contrario el lodo se envía directamente de los digestores o

espesadores con una concentración de sólidos aproximada de 5%, para su disposición con otros residuos sólidos, el peso del exceso de líquido puede duplicar o triplicar el peso total del relleno, generando una cantidad excesiva de lixiviados que deben ser canalizados y, en ocasiones, tratados para prevenir una posible contaminación de corrientes subterráneas (De Bekker y van den Berg, 1987).

De Bekker y van den Berg (1987) informan que con una concentración de sólidos superior a 35%, la operación de un relleno sanitario mixto (lodos residuales y residuos domésticos sólidos) resulta práctica y relativamente flexible con respecto a la proporción entre el lodo y los desechos sólidos. Tal concentración de sólidos puede alcanzarse con relativa facilidad si el lodo, previamente acondicionado, se deshidrata en filtros prensa o filtros banda a presión. Para lodos acondicionados con polielectrolitos orgánicos y deshidratados en filtros banda, se recomienda una relación en peso de desechos domésticos sólidos a lodos residuales aproximadamente de 4:1 (De Bekker y van den Berg, 1987). Sin embargo, la proporción adecuada solo puede determinarse prácticamente y mediante la experiencia del operador del relleno sanitario.

Además de aspectos físicos, los lodos están sujetos a diferentes procesos fisicoquímicos y bioquímicos, como la descomposición de materia orgánica por medio de la actividad de microorganismos, primero en fase aerobia y posteriormente anaerobia, y fenómenos de adsorción-desorción de algunas especies químicas.

Si el relleno sanitario se opera adecuadamente, funciona como un reactor biológico anaerobio; sin embargo, es necesario controlar y optimizar el proceso, especialmente para mejorar la estabilización de la fracción orgánica y controlar la producción de lixiviados. Durante la fase anaerobia se generan gases como producto de la actividad de los microorganismos, conocidos como "biogás". La formación de biogás como producto del proceso de descomposición de la materia orgánica con respecto al tiempo, se muestra en la figura 8.3.

Si el relleno se efectúa únicamente con lodos de aguas residuales es importante estabilizar previamente el residuo para reducir la posibilidad de contaminar corrientes subterráneas y superficiales por organismos patógenos presentes en los lixiviados.

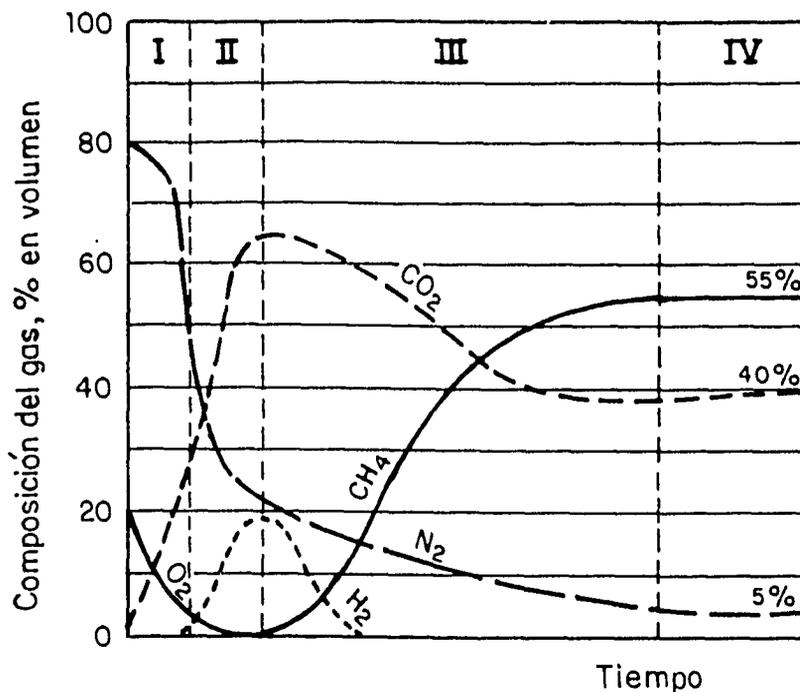


Fig. 8.3 Formación de biogás durante la descomposición de material orgánico (Balmér, 1987).

Ahora bien, si se trata de un relleno sanitario para otros residuos sólidos de origen doméstico, se ha comprobado que si se mezclan lodos residuales estabilizados en una proporción no mayor al 30%, se acelera la descomposición de la materia orgánica presente en la basura, mejorando el proceso bioquímico (Boari y Mancini, 1987). La figura 8.4 muestra que la presencia de lodo en un relleno sanitario para basura de origen doméstico reduce aproximadamente dos años el tiempo antes de que comience la fase estable de formación de metano.

Por otra parte, cuando el lodo tratado con cal se usa como cubierta final del relleno, se recomienda deshidratar el lodo hasta una concentración de sólidos aproximada de 25% y aplicar una dosis de cal de aproximadamente 200 kg de CaO y 400 kg de $CaCO_3$ por tonelada de sólidos secos, y aplicarlo en una capa de 1 m de espesor, aunque se han aplicado capas de hasta 4 m de espesor con resultados

similares (Balmér, 1987). Una vez que se ha compactado esta capa de lodo es recomendable aplicar una capa de composta o tierra de aproximadamente 0.2 m de espesor para sembrar pasto. Este método ofrece la ventaja de que el lodo finaliza su etapa de descomposición aerobia más rápida y fácilmente que el lodo dispuesto dentro del relleno.

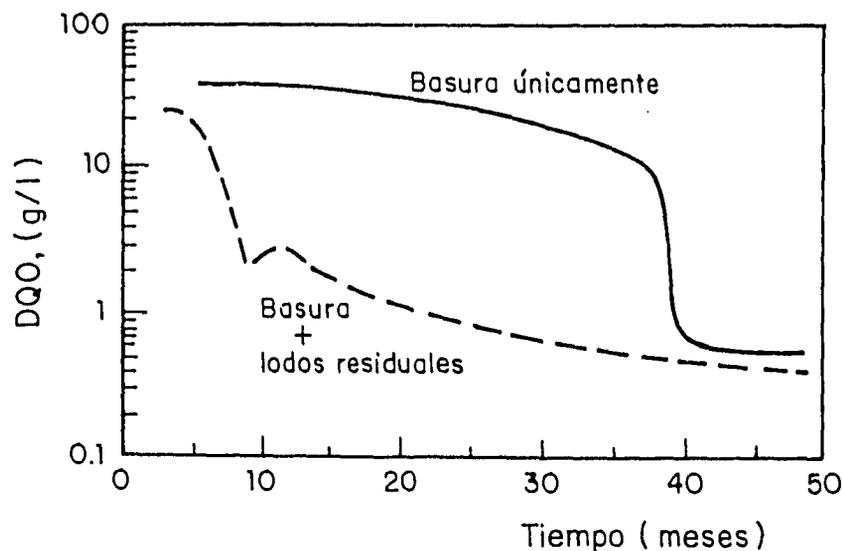


Fig. 8.4 Influencia de la presencia de lodos residuales en el contenido de materia orgánica en los lixiviados generados en un relleno sanitario para otros residuos (Boari y Mancini, 1987).

Desde el punto de vista ambiental, los principales problemas en la operación de un relleno sanitario se relacionan con las emisiones hacia el suelo y corrientes subterráneas por medio de los lixiviados, hacia corrientes superficiales por medio de lixiviados y el escurrimiento del agua de lluvia, y a la atmósfera por el biogás generado (metano, dióxido de carbono, amoníaco). Por esto, es importante prever su comportamiento antes de diseñar el relleno.

Una vez que se han identificado las características del lodo y el tratamiento que requiere para su disposición en relleno sanitario, ya sea solo o combinado con

otros desechos domésticos sólidos, es necesario efectuar algunos estudios que incluyen generalmente los aspectos siguientes (Morales, 1988):

1. Localización del sitio adecuado.
 - Uso del suelo;
 - tenencia de la tierra;
 - disponibilidad de compra o concesión;
 - localización con respecto al sitio de producción del residuo;
 - bancos de materiales para la cubierta;
 - topografía y relieve.
2. Estudios geohidrológicos e hidrológicos.
 - Geología;
 - climatología;
 - flora y fauna;
 - estratigrafía;
 - hidrología;
 - geohidrología.
3. Estudios de mecánica de suelos.
4. Diseño.
 - De capas y celdas;
 - del método del relleno;
 - del recubrimiento;
 - de viabilidad;
 - de operación
5. Captación y uso de biogás.

8.2.2 Consideraciones de diseño

El diseño y comportamiento a largo plazo de un relleno sanitario está relacionado de manera estrecha con la geología y la climatología del sitio. Los factores geológicos determinan en gran medida el método de diseño del relleno, mientras que los factores climatológicos, principalmente el ciclo del agua, influyen sobre la operación del relleno y diseño de los sistemas para el control de lixiviados.

8.2.2.1 Factores climatológicos

El ciclo hidrológico del agua comprende los siguientes fenómenos: precipitación, escurrimiento, infiltración, evaporación y transpiración de las plantas.

La precipitación influye en el diseño de un relleno sanitario, ya que será parte importante en el cálculo de la producción potencial de lixiviados y del agua de escurrimiento y del diseño de los drenajes, si se requieren. Es importante considerar también su influencia en la operación del relleno durante la temporada de lluvias, ya que la precipitación pluvial puede hacer que el material para cubrir el relleno sea más difícil de esparcir y compactar.

La evaporación y transpiración normalmente se miden en un solo parámetro llamado "evapotranspiración" que indica la cantidad de agua de lluvia que regresa a la atmósfera. Para llevarse a cabo la evaporación intervienen uno o más de los siguientes factores: temperatura, viento, presión atmosférica y naturaleza de la superficie. El proceso de evapotranspiración interviene en el cálculo de producción y evaporación de lixiviados.

Por otra parte, se denomina escurrimiento al agua de lluvia que escurre sobre la superficie y alimenta corrientes de agua. Es la única de las componentes del ciclo hidrológico que puede conocerse con cierta precisión en una cuenca determinada. El coeficiente de escurrimiento es función de la intensidad de la precipitación, de la permeabilidad de la superficie del suelo, de la duración de la precipitación, del tipo de vegetación, del área de la cuenca, de la distribución de la precipitación, de la profundidad del nivel de aguas freáticas, de la pendiente superficial, etc. En zonas áridas, los factores mencionados pueden reducir a cero el coeficiente de escurrimiento.

El agua de escurrimiento tiene un efecto importante en el diseño y la operación de un relleno sanitario, principalmente en el diseño de los drenajes del sitio, ya que si

no es controlada adecuadamente puede causar graves problemas e incluso puede llegar a dejar inoperable el sitio en temporada de lluvias.

La infiltración depende de factores como tipo de suelo, influencia del clima e influencia de la vegetación. Sobre un terreno impermeable (arcilla o roca) prácticamente escurre toda el agua de lluvia, e inversamente, en suelos muy permeables (arena, grava, roca fisurada, etc.) la mayor parte del agua se infiltra. En las zonas áridas las lluvias fuertes no tienen tiempo para penetrar lo suficiente en el suelo para alimentar los mantos freáticos, y son a menudo retomadas por evaporación. Por otra parte, la vegetación regula infiltración y tiene la capacidad de atenuar los efectos de la erosión y de la evaporación sobre el suelo.

En el diseño de un relleno sanitario deberá tomarse en cuenta la capacidad de infiltración del material de la cubierta para regular o evitar la infiltración hacia los desechos depositados dentro del relleno.

La temperatura es otro factor importante para el diseño y operación del relleno, así como de su comportamiento geohidrológico. Al aumentar la temperatura se acelera la descomposición de la materia orgánica y la generación de gases y, por otra parte, el agua se hace menos densa y se filtra con mayor facilidad hacia los estratos de desecho.

Por otra parte, los vientos son causa de algunos de los problemas de operación, por ejemplo el esparcimiento de residuos y malos olores, resultado de alguna falla en la operación del sistema. En algunos casos es conveniente incluir en el diseño del relleno bardas móviles para controlar este tipo de problemas.

8.2.2.2 Producción y comportamiento de lixiviados

En un buen diseño debe contemplarse la consideración de la generación potencial de lixiviado, así como la forma en que pueda canalizar una descarga de éste tipo por medio de drenajes apropiados y colectores, si es necesario.

En un relleno sanitario de lodos, los lixiviados provienen en su mayor parte del agua que es liberada por efecto de la compresión del lodo a largo plazo y del agua de lluvia que se infiltra. Si el lodo se deshidrata antes de su disposición final, la producción esperada de lixiviados se minimiza.

Normalmente, el lixiviado se somete a las etapas siguientes al pasar a través del relleno:

- filtración;
- absorción;
- adsorción;
- precipitación química;
- acción bacteriológica.

El grado de filtración depende entre otras cosas del tamaño de los poros en el suelo. Conforme se retienen partículas sólidas en el suelo, se irá disminuyendo la capacidad de infiltración de ese suelo, porque el tamaño de poro se reduce. Las partículas sólidas retenidas de esta forma, primordialmente de naturaleza orgánica, pueden ser descompuestas por la acción de microorganismos presentes en el sistema.

Como resultado de la acción biológica, el lixiviado contiene material orgánico e inorgánico disuelto, que pasa a través del sistema; sin embargo, la mayoría de los suelos tienen la capacidad de absorber líquidos y retenerlos por un período de tiempo razonable para que sucedan transformaciones biológicas u otros mecanismos de intercambio de las especies presentes en el lixiviado, tales como fenómenos de adsorción. Dichas transformaciones dependen de la presencia de sustancias químicas en el suelo, que tienen la capacidad de reaccionar con las presentes en el lixiviado y producir sustancias más fáciles de descomponer.

En este caso, el material orgánico disuelto y suspendido en el lixiviado posee gran cantidad de sitios cargados eléctricamente, que pueden ser atraídos al pasar éste a través del suelo por cargas eléctricas opuestas. En las moléculas de suelo se pueden encontrar campos cargados tanto negativa como positivamente, pero en los minerales arcillosos predominan las cargas eléctricas negativas (Morales, 1988). Al parámetro mediante el cual se cuantifica este fenómeno se le llama

capacidad de intercambio catiónico. Algunos factores que influyen en el proceso son: temperatura, pH, potencial redox, contenido de material orgánico y conductividad eléctrica.

Un suelo con buenas características de intercambio catiónico tienen el potencial para retener la mayoría de los contaminantes más comunes en un lixiviado típico. Sin embargo, la particularidad de los suelos arcillosos de retener partículas cargadas es importante no solo en el mecanismo de renovación del lixiviado, sino también en el aumento de fertilidad de los suelos.

Por otra parte, como resultado de las reacciones bioquímicas que tienen lugar durante el curso de la percolación a través del suelo, algunos constituyentes del lixiviado, inicialmente tomados en solución, pueden ser precipitados. En dichos procesos, el precipitado normalmente se desplaza hacia el fondo de la superficie que lo contiene y las sales insolubles son entonces fácilmente filtradas a través de las capas de suelo. Uno de los factores más importantes que influyen en la precipitación es el pH; en general, mientras más alto es el pH en el complejo suelo-humedad, mayor será la tendencia a que la precipitación tenga lugar.

8.2.2.3 Estudios geotécnicos y geohidrológicos

El objetivo primordial de los estudios geotécnicos y geohidrológicos es analizar y evaluar las propiedades físicas y mecánicas del subsuelo del lugar, así como del material del relleno y otros materiales para determinar las condiciones geotécnicas e hidráulicas idóneas de los rellenos sanitarios que constituirán el proyecto.

Un estudio geohidrológico debe tener la información siguiente:

- Potencial de infiltración del material de la cubierta;
- potencial de transmisión del subsuelo;
- capacidad de absorción del subsuelo;
- potencial para viajar a distancia;
- velocidad de las corrientes de agua subterránea;

- distancia de la interfase entre el nivel de aguas freáticas y el fondo del relleno.

En este caso es importante enfocar los estudios geohidrológicos a la capacidad de absorción y de retención de las aguas pluviales por los materiales que constituirán la cubierta de los rellenos sanitarios para poder evaluar el volumen posible de lixiviado debido a la infiltración de agua de lluvia. Es necesario determinar la porosidad y la permeabilidad de dichos materiales para un cierto grado de compactación previamente especificado que generalmente es de 80% Proctor (Morales, 1988).

Por otra parte, el objetivo principal de la determinación del potencial de transmisión del subsuelo es evaluar las propiedades físicas y mecánicas del terreno natural para repeler, retener y transminar el lixiviado a través de él. Este parámetro es función del grado de permeabilidad del subsuelo y otros factores como accidentes geológicos de la superficie (depresiones, fallas tectónicas, etc.), topografía, condiciones de drenaje (acequias, arroyos, etc.), grado de saturación natural del suelo y grado de intercambio catiónico.

Otra consideración importante es la estabilidad mecánica del depósito. De Bekker y van den Berg (1987) informan los resultados de algunas investigaciones teóricas que establecen las relaciones entre concentración de sólidos de tres tipos de lodos y su resistencia al esfuerzo (ver figura 8.5). La investigación muestra que la fuerza de cohesión del lodo a una concentración de sólidos de 38% es aproximadamente 10 kN/m^2 .

Además de la fuerza de cohesión, la resistencia al esfuerzo también se ve afectada por la fricción, pero si se considera despreciable, la fuerza de cohesión podría ser considerada como la resistencia mínima al esfuerzo.

En la práctica deben tomarse medidas para mejorar la consistencia del lodo, por ejemplo, con la estabilización parcial del residuo y entonces mezclarlo con arena, cal o residuos domésticos.

Una vez que se ha definido el lugar idóneo y se han hecho las investigaciones correspondientes, se procede al diseño del mismo.

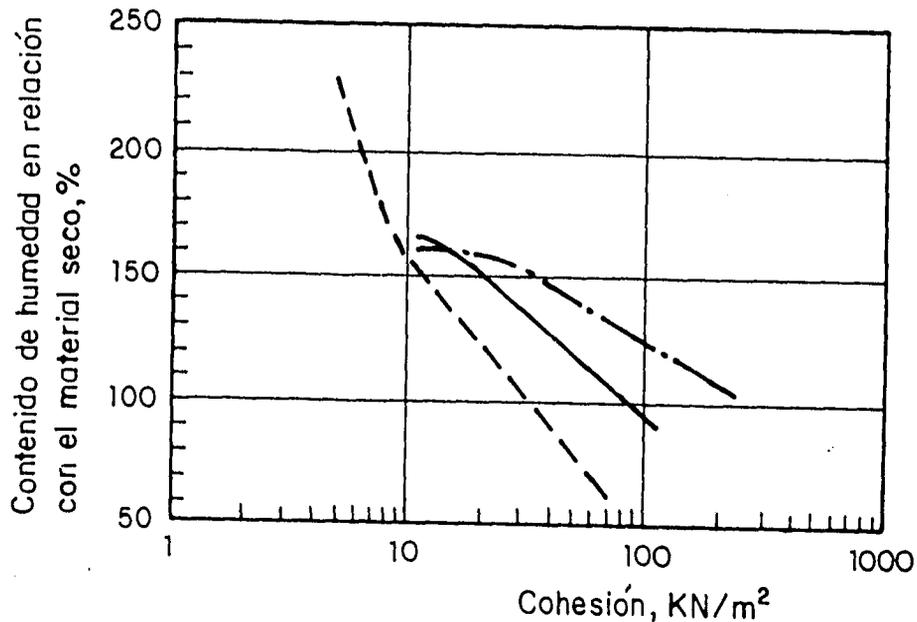


Fig. 8.5 Cohesión de tres tipos de lodo en función del contenido de agua (De Bekker y van den Berg, 1987).

8.2.3 Métodos de diseño y operación

En esta etapa, después de tener los datos preliminares del sitio elegido y las características de los residuos y de la zona, se puede optar por cualquiera de los métodos de diseño existentes. El método seleccionado dependerá de las características naturales del suelo del sitio elegido y de la cantidad y características de los residuos a ser dispuestos. Algunos de los métodos empleados son: el método de área, el método de trinchera, y métodos combinados como el método de rampa y el método por depresión (ver figura 8.6).

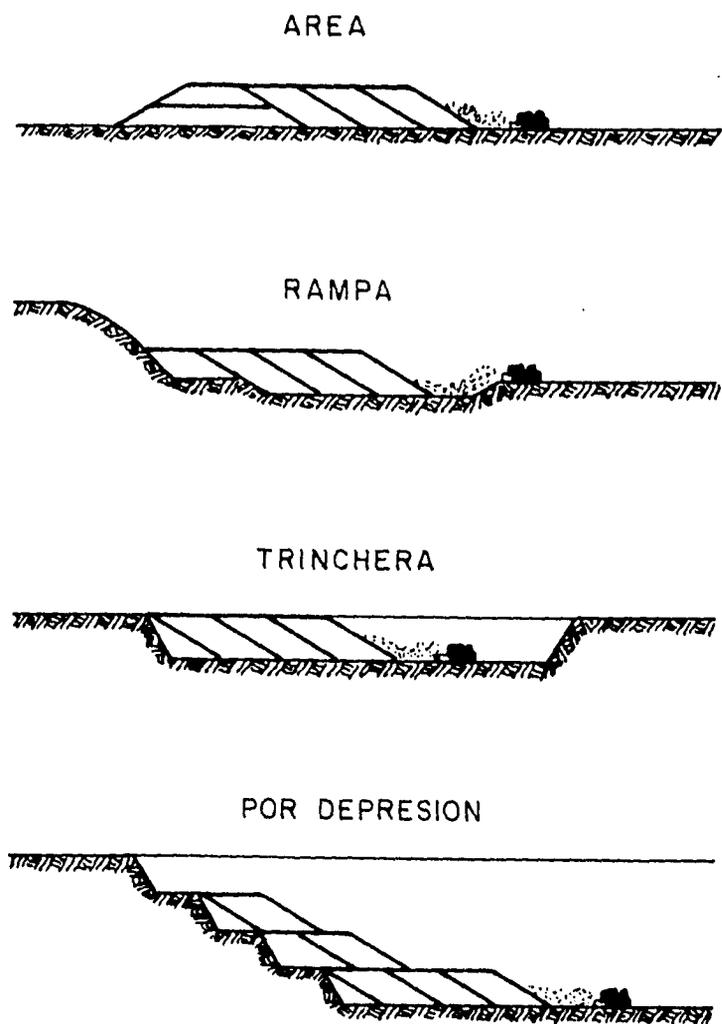


Fig. 8.6 Diferentes métodos de operación de rellenos sanitarios

Método de área

El método de área consiste en depositar los residuos, compactarlos y cubrirlos con tierra al final de cada jornada de trabajo, sobre un terreno natural normalmente plano para crear las "celdas diarias". Conforme se forman las celdas, el relleno va adquiriendo una pendiente sobre la cual se depositan y compactan los residuos para formar las celdas siguientes.

Este método se puede usar prácticamente en cualquier área de terreno disponible, de tal manera que se puede llevar a cabo en canteras abandonadas, depresiones o ciénegas, siempre y cuando la distancia para transportar el material de la cubierta no sea muy grande.

Los equipos comúnmente usados para la operación del relleno por el método de área, son los tractores sobre orugas para el extendido y compactado de los desechos, la moto-escrepa para transportar y depositar el material de cubierta sobre las celdas terminadas y las motoniveladoras para darle la pendiente final al sitio donde se lleva a cabo el relleno sanitario.

Método de trinchera

Este método consiste en depositar los residuos en una trinchera cavada especialmente para este propósito. Los desechos son esparcidos en la base de la trinchera y posteriormente compactados en capas hasta formar una celda, para después ser cubierta con el material excavado de la trinchera y compactándolo sobre la celda de desechos ya elaborada.

El método de trinchera se utiliza en los lugares donde el nivel de aguas subterráneas no es muy superficial, las pendientes del sitio son suaves y las características del suelo son tales que pueda ser excavado utilizando equipos comunes para el movimiento de la tierra.

Los suelos que tengan características cohesivas, tales como las arcilla, son recomendables para la construcción de la trinchera debido a que las paredes de las mismas pueden ser casi verticales y así las trincheras pueden ser construídas en espacios reducidos.

Para la excavación de la trinchera es más común utilizar retroexcavadoras y dragas que bulldozers; sin embargo, cuando se trata de esparcir, compactar y cubrir, los tractores de oruga son más socorridos.

Métodos combinados

En casos especiales, cuando las condiciones geohidrológicas del sitio elegido son propicias, se puede llevar a cabo el relleno usando una combinación de los dos métodos descritos anteriormente.

Existen combinaciones muy usadas cuando las condiciones locales lo permiten. Una es de iniciar por el método de trinchera y posteriormente, cuando el área se ha completado, se continúa por el método de área en la parte superior.

Otro es el método conocido como de rampa, y consiste en iniciar el relleno por el método de área y posteriormente excavar el material para cubierta en donde termina la celda ya construida. Este método se considera más eficiente que los dos primeros, excepto por la necesidad de condiciones particulares del sitio donde se va a llevar a cabo.

Con el método de rampa se ahorra el transporte de material de cubierta y se aumenta la vida útil del sitio debido a que una parte de los desechos son depositados debajo de la superficie original.

El método conocido como relleno por depresión se puede utilizar en lugares abiertos donde existan depresiones naturales o artificiales (cañones, cañadas, barrancas, canteras, fosos, etc.), que pueden utilizarse para efectuar operaciones efectivas de llenado y compactación. La técnica para colocar y compactar los desechos en el relleno varía de acuerdo con las características del material de recubrimiento, la geometría, hidrología, topografía y geología del sitio, así como con la facilidad de acceso al mismo.

8.2.3.1 Formación de las celdas

Se recomienda que la disposición de los residuos se efectúe en capas de no más de 60 cm, que deben compactarse mediante equipo mecánico hasta un espesor no mayor a 15 cm. Las operaciones de disposición y compactación deben repetirse

sucesivamente hasta finalizar la jornada de trabajo, para proceder a cubrir los residuos, y así concluir la formación de una celda diaria. Después de las compactaciones, la diferencia entre cada capa debe ser imperceptible.

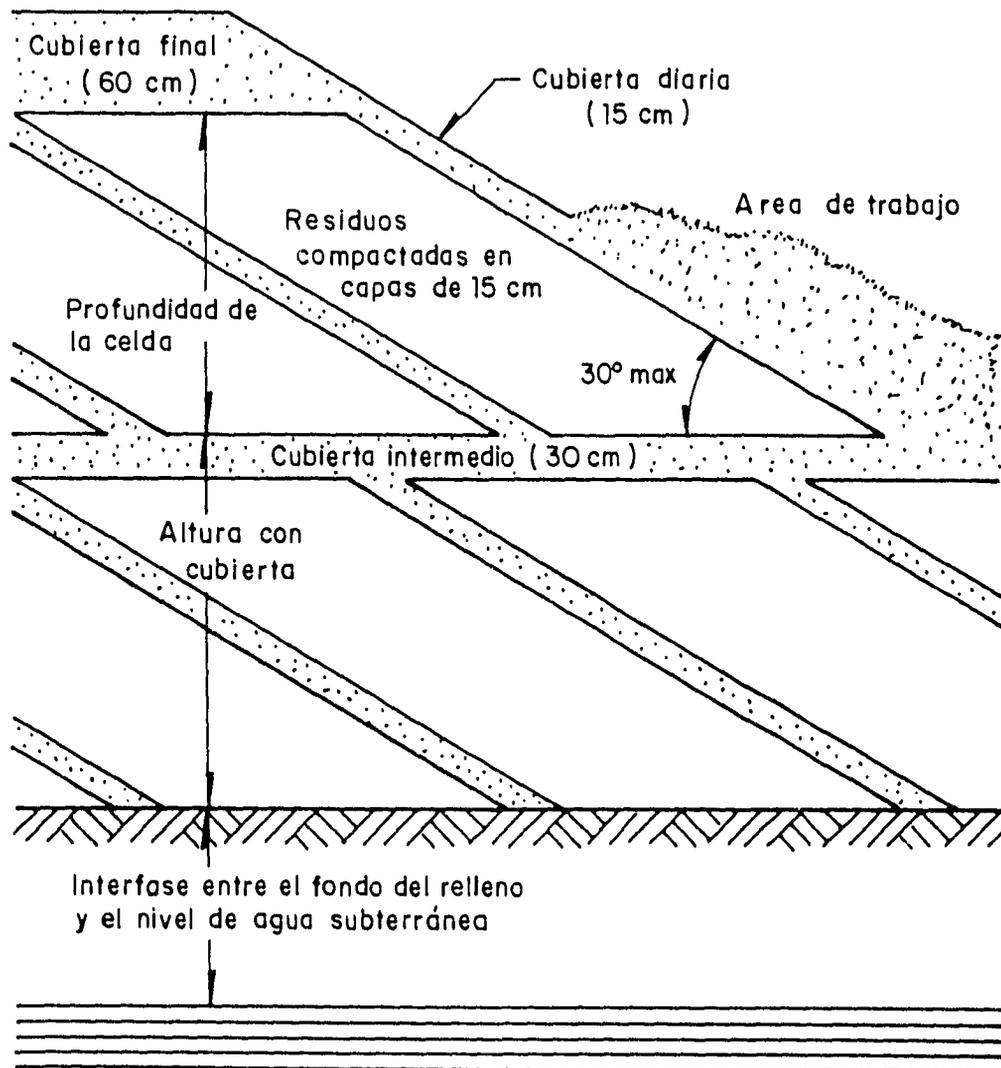


Fig. 8.7 Construcción típica de una celda

El cubrimiento apropiado de los desechos es considerado por diversos autores como la etapa más importante en la operación de un relleno sanitario, ya que es determinante para el control de posibles emisiones de malos olores, para evitar el

contacto de los desechos, para evitar incendios, para proporcionar una superficie relativamente impermeable, etc. (Glysson *et al*, 1972; Bagchi, 1990).

Normalmente, se recomiendan tres espesores para los diferentes tipos de cubierta de las celdas: cubierta diaria, cubierta intermedia y cubierta final (ver figura 8.7). Se recomienda un espesor de tierra o lodo tratado de 15 cm para la cubierta diaria de los residuos o, más frecuentemente, si se requiere debido al consumo de residuos, un espesor de tierra de 30 cm sobre las celdas inferiores para proteger su superficie y un espesor de tierra de 60 cm para la cubierta final del relleno, que generalmente se siembra con pasto para prevenir la erosión.

Como se indica en la figura 8.7, la pendiente máxima recomendada para el área de trabajo es de 30°. Generalmente, la compactación debe llevarse a cabo hacia arriba, de manera que se presionen los desechos sólidos contra una resistencia.

No se tiene una profundidad estandar de la celda. La profundidad óptima debe determinarse en cada caso acuerdo con la cantidad diaria de residuos por disponer y la elevación final planeada; sin embargo, se recomienda que la profundidad de las celdas permanezca uniforme a lo largo de toda la operación del relleno. Cualquiera que sea la profundidad de las celdas, es importante que la cubierta tenga cierta pendiente para facilitar el escurrimiento del agua de lluvia.

Es importante notar también que debe considerarse una distancia suficiente entre la base del relleno y el nivel de aguas subterráneas, para evitar en lo posible su contaminación por la infiltración de lixiviados.

Vidales (1988) presentó un trabajo en el que recomienda minimizar el área de la celda diaria de un relleno sanitario con el fin de reducir el material empleado como cubierta. Proporciona algunas ecuaciones de diseño para determinar el área óptima, para lo cual señala que es importante conocer los siguientes factores: el volumen diario de residuos por disponer, sus propiedades físicas y químicas para poder calcular las necesidades de espacio que ocuparán los desechos dispuestos, la cantidad de material para la cubierta diaria, el equipo mínimo requerido y el personal de operación y apoyo que se requiere, etc.

9. RESUMEN, CONCLUSIONES Y PROPUESTA FINAL

Los lodos que se obtienen como subproducto del tratamiento de aguas residuales contienen gran cantidad de agua, material orgánico contaminante que es separado del agua residual y biomasa que se genera durante el proceso. Dichos lodos pueden constituir una fuente importante de contaminación, de manera que no debe considerarse concluido el tratamiento de aguas residuales sin efectuar de manera integral el correspondiente tratamiento de lodos, antes de proceder a su disposición final. Desgraciadamente, en México aún no se han tomado las medidas suficientes para enfrentar este problema, lo cual ha limitado notablemente la posibilidad de adquirir experiencia suficiente y de adaptar tecnología adecuada.

Para reducir el problema, es necesario tomar conciencia del riesgo ambiental que representa la descarga de lodos residuales directamente al drenaje o a cuerpos

receptores naturales y considerar la implementación de sistemas para su tratamiento cuya instalación y operación sean factibles de acuerdo con las posibilidades y necesidades del país. Para seleccionar los sistemas que integren el proceso de tratamiento, es importante tomar en cuenta los recursos humanos y materiales del país, así como la infraestructura característica en materia de control ambiental (limitaciones económicas, falta de personal capacitado, poca experiencia de plantas en operación, etc.) y, por otro lado, la necesidad de obtener buenos resultados a corto plazo. De esta manera, los sistemas propuestos deben resolver el problema de forma sencilla, económica y lo más rápida y eficientemente posible.

En general, un tren para tratamiento de lodos debe incluir procesos para reducir la cantidad del líquido y procesos para disminuir el contenido del material orgánico presente. De acuerdo con las posibilidades y necesidades establecidas, los métodos recomendados en este trabajo para eliminar agua son: espesamiento por gravedad, deshidratación en lechos de secado y deshidratación mecánica mediante filtros prensa o filtros banda. Los métodos propuestos para reducir el contenido de material orgánico, conocidos como métodos para la estabilización de lodos, incluyen: digestión anaerobia, digestión aerobia y estabilización con cal. Dependiendo del caso específico se pueden hacer diferentes combinaciones de estos sistemas y procedimientos.

Los criterios utilizados para establecer un tren de tratamiento apropiado de acuerdo con las necesidades específicas de cada caso se basan en la evaluación de las características del lodo, la forma de disposición final, en el conocimiento de las interrelaciones entre los sistemas que constituyen las diferentes etapas del tratamiento y en algunos factores externos. Por ello, antes de determinar la secuencia de tratamiento es importante obtener la mayor cantidad de información posible.

Entre los factores referentes a las características del lodo se encuentran los siguientes:

- Caudal promedio de lodo;
- tipo de lodos (primarios, biológicos, químicos);
- concentración de sólidos totales;
- contenido de material orgánico;

- presencia de productos químicos;
- propiedades generales del lodo (densidad, viscosidad, pH, índice volumétrico de lodos, etc.); y
- forma de operación de la planta.

Mientras que entre los factores externos se encuentran los siguientes:

- Limitaciones económicas;
- instalaciones existentes;
- limitaciones de espacio;
- condiciones ambientales; y
- expectativas para el manejo del lodo tratado.

Si se trata de una planta en fase de diseño y/o si no se cuenta con el lodo para determinar sus características específicas, es posible extrapolar datos de instalaciones similares para una primera aproximación de diseño.

El espesamiento por gravedad es recomendable prácticamente en todos los casos como primer paso de tratamiento, principalmente porque reduce de manera significativa el volumen de lodo por manejar y, por consiguiente, el tamaño y costos de los sistemas de tratamiento subsecuentes. Algunas excepciones pueden ser las plantas pequeñas que generan caudales de lodo tan bajos que no justifican la inversión de un sistema de espesamiento. Si la planta cuenta con sistemas de tratamiento primario y biológico, se recomienda mezclar los lodos primarios y secundarios antes de llevar a cabo el espesamiento, para elevar la concentración de sólidos de los lodos biológicos y de esta manera facilitar el proceso de sedimentación. Los principales parámetros para el diseño de un sistema de espesamiento son la carga hidráulica y la carga de sólidos.

Además del espesamiento, en la mayoría de los casos es conveniente deshidratar el lodo, generalmente después de su estabilización, para minimizar el volumen por disponer y facilitar su manejo y transporte. El sistema de deshidratación adecuado es función del caudal de lodo, de las posibilidades económicas y de espacio, etc. Siempre que sea posible es preferible elegir como primera opción los sistemas mecánicos debido a que la deshidratación en lechos está condicionada a un buen diseño de los sistemas para recolección de líquido y de la construcción en general

y a la disposición del espacio suficiente, además de que pueden presentarse importantes problemas de operación, como inundación en temporada de lluvias en lechos descubiertos, emisión de malos olores, atracción de insectos, etc.

Por su parte la deshidratación mediante sistemas mecánicos generalmente proporciona una eficiencia mayor, ofrece una operación menos problemática, y, aunque representa una inversión inicial alta, resulta suficientemente rentable a largo plazo porque es un método mucho más rápido y requiere menos personal para su operación. Para caudales de lodo bajos es más conveniente emplear filtros prensa y, por el contrario, cuando se manejan caudales mayores son más recomendables los filtros banda.

Asimismo, es importante considerar que siempre que se lleve a cabo deshidratación de lodos debe planearse también su acondicionamiento para facilitar el proceso. El acondicionamiento de lodos con productos químicos es eficiente y ofrece algunas ventajas sobre otros, como su simplicidad de operación. Es necesario elegir el o los agentes químicos de acuerdo con el sistema de deshidratación que será empleado, y la dosis correcta de acuerdo con la cantidad y características del lodo que será manejado.

Normalmente se recomienda que la deshidratación de lodos sea precedida por algún método de estabilización. La estabilización es un proceso indispensable en el tratamiento de lodos para reducir los riesgos de transmisión de enfermedades causadas por microorganismos patógenos presentes en ellos y la posible contaminación de acuíferos subterráneos y superficiales. Puede llevarse a cabo mediante métodos muy sencillos y suficientemente eficientes como la estabilización con cal, o bien mediante métodos sofisticados y más eficientes como la digestión anaerobia o la digestión aerobia.

La estabilización con cal se recomienda principalmente por sus bajos costos y simplicidad de operación, además de ser un proceso que requiere poco equipo. El lodo tratado con cal ofrece algunas ventajas cuando se utiliza como mejorador de tierras agrícolas o cuando se dispone en relleno sanitario, principalmente porque mantiene el pH del suelo lo suficientemente elevado para evitar el desarrollo de gran cantidad de microorganismos. Para asegurar una buena eficiencia es importante proporcionar la dosis de cal adecuada y un mezclado suficiente.

Cuando se manejan caudales de mayor importancia y se cuenta con los recursos técnicos y económicos necesarios es recomendable estabilizar mediante digestión aerobia, excepto cuando la planta opere mediante el sistema de aeración extendida ya que este método por si mismo constituye una forma de digestión. En este último caso se recomienda mezclar el lodo con cal y deshidratarlo por medios mecánicos. Uno de los factores más importantes cuando se lleva a cabo digestión aerobia consiste en proporcionar la aeración y el tiempo de retención suficientes.

La digestión anaerobia también proporciona una estabilización eficiente y sus costos de operación suelen ser menores que en el proceso aerobio; sin embargo, los costos capitales son mayores y es un proceso mucho más sensible a variaciones (temperatura, pH, caudal, concentración de sustrato, etc.), por lo que su instalación debe estudiarse cuidadosamente y asegurarse de que se cuente con los medios suficientes para mantener el proceso. Puede considerarse una buena alternativa y probablemente a largo plazo se cuente con la experiencia y el personal capacitado necesario para operar correctamente el sistema como primera opción, principalmente por la recuperación de energéticos.

La disposición final del lodo tratado constituye un factor determinante en la selección del tren de tratamiento apropiado. Uno de los métodos más atractivos consiste en su reutilización como mejorador de suelos agrícolas o forestales, principalmente si consideramos la amplia gama de posibilidades que pueden ofrecer los suelos agrícolas a los que puede aplicarse el lodo para reducir los requerimientos de fertilizantes. Por otra parte, también es factible considerar su disposición en rellenos sanitarios debido a que, aunque es evidente que el país cuenta con pocos rellenos sanitarios operando correctamente, constituyen una buena alternativa para la disposición de residuos.

Dependiendo del caso específico se pueden hacer diferentes combinaciones de los diferentes sistemas y procedimientos propuestos para integrar un tren de tratamiento apropiado.

En México, la mayor parte todas las plantas para tratamiento de aguas residuales operan con sistemas de lodos activados en sus diferentes modalidades (SEDUE, 1989). Tomando en cuenta estos antecedentes generales, a continuación se

propone una secuencia típica para el tratamiento de los lodos generados en plantas para tratamiento de aguas residuales de origen predominantemente doméstico que operen mediante lodos activados, integrada por algunos de los sistemas recomendados en este trabajo y susceptible a ser modificada de acuerdo con las necesidades específicas de cada caso.

Se recomienda iniciar el tratamiento con espesamiento por gravedad de la mezcla de los lodos primarios y biológicos, o exclusivamente de los lodos biológicos si la planta no cuenta con sedimentador primario. A continuación, se propone llevar a cabo un proceso de digestión aerobia convencional de operación continua, para después mezclar el lodo con sales inorgánicas (cal y cloruro férrico) como acondicionamiento para deshidratarlo en filtro prensa.

REFERENCIAS

- 1.- Aguilar, C F, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEDUE, Subdirección de residuos sólidos, comunicación personal (1991).
- 2.- American Public Health Association, APHA, Standard methods for the examination of water and wastewater, 16a. ed, APHA/AWWA/WPCF, Washington DC, EUA (1985).
- 3.- Bagchi, A, Design, construction and monitoring of sanitary landfill, John Willey & sons Inc., EUA (1990).
- 4.- Balmér, P, "Experiences with limed sludge as a top cover for landfills", en Treatment of sewage sludge: thermophilic aerobic digestion and processing requirements for landfilling, Bruce, A M, Colin, F, y Newman, P J (eds), Elsevier applied science, Gran Bretaña (1989), 92-96.
- 5.- Benefield, L D, y Randall, C W, Biological process design for wastewater treatment, Prentice-Hall inc., Englewood cliffs, EUA (1980).

- 6.- Billmeir, E, "The influence of blade height on the removal of sludge from activated sludge settling tanks", Water Science and Technology, Vol. 20, Gran Bretaña (1988), 165-172.
- 7.- Boari, G, y Mancini, I M, "Landfill leachate: operating modalities for its optimal treatment" en Treatment of sewage sludge: thermophilic aerobic digestion and processing requirements for landfilling, Bruce, A M, Colin, F, y Newman, P J (eds), Elsevier applied science, Gran Bretaña (1989), 80-91.
- 8.- Bruce, A M, y Fisher, W J, "Sludge stabilisation-methods and measurement" en Sewage sludge stabilisation and disinfection, Bruce, A M (ed), Water Research Center/Ellis Horwood Limited, Gran Bretaña (1984), 23-47.
- 9.- Brunner, P H, y Lichtensteiger Th, "Landfilling of sewage sludge - practice and legislation in Europe" (1987) en Treatment of sewage sludge: thermophilic aerobic digestion and processing requirements for landfilling, Bruce, A M, Colin, F, y Newman, P J (eds), Elsevier applied science, Gran Bretaña (1989), 52-57.
- 10.- Cheremisinoff, P N, "Special report: hazardous material and sludge treatment and disposal", Pollution Engineering, Vol. 20, No. 12, (1988), 66-73.
- 11.- Cornier, J C, Divet, L, y Moreaud, H, "Recent developments in sludge conditioning and dewatering", Water Science and Technology, Vol. 15, No. 4, Gran Bretaña (1983), 49-58.
- 12.- Culp, R L, Wesner, G, y Culp, G, Handbook of advanced wastewater treatment, 2a. ed, Van Nostrand Reinhold, EUA (1978).
- 13.- De Bekker, P H A M J, y Van Den Berg, J J, "Landfilling with sewage sludge", en Treatment of sewage sludge: thermophilic aerobic digestion and processing requirements for landfilling, Bruce, A M, Colin, F, y Newman, P J (eds), Elsevier applied science, Gran Bretaña (1989), 72 - 79.
- 14.- Degremont, Manual técnico del agua, Partes I y II, 4a. ed, Artes Gráficas Grijelmo, España (1979).

- 15.- Departamento del Distrito Federal, DDF, Diseño de procesos de la planta de tratamiento de aguas residuales San Luis Tlaxialtemalco, Dirección general de operación y construcción hidráulica, México (1987).
- 16.- Departamento del Distrito Federal, DDF, El sistema hidráulico del Distrito Federal. Un servicio público en transición, Dirección general de operación y construcción hidráulica, México (1982).
- 17.- Diario oficial a, Ley general del equilibrio ecológico y protección al medio ambiente, título primero, capítulo II, artículo 5º, fracción XIX, Diario Oficial de la Federación, 28 de enero, México (1988).
- 18.- Diario oficial b, Ley general del equilibrio ecológico y protección al medio ambiente, título primero, capítulo V, artículo 29, fracción VI, Diario Oficial de la Federación, 28 de enero, México (1988).
- 19.- Diario oficial c, Norma técnica ecológica NTE-CRP-001/88, artículo 4º, fracción II, Diario Oficial de la Federación, 6 de junio, México (1988).
- 20.- Diario oficial d, Reglamento de la ley general del equilibrio ecológico y protección al medio ambiente en materia de residuos peligrosos, capítulo I, artículo 6º, Diario Oficial de la Federación, 25 de noviembre, México (1988).
- 21.- Diario oficial e, Reglamento de la ley general del equilibrio ecológico y protección al medio ambiente en materia de residuos peligrosos, capítulo III, artículo 31, Diario Oficial de la Federación, 25 de noviembre, México (1988).
- 22.- Eckenfelder, W W, y Ford, A L, Water pollution control: experimental procedures for process design, The penberton press jenkins publishing company, New York, EUA (1970).
- 23.- Eden, G E, "Modern trends in sludge manegement:sludge conditioning", Water Science and Technology, Vol. 15, No. 4, Gran Bretaña (1983), 37-48.

- 24.- Environmental Protection Agency, EPA, Process design manual for sludge treatment and disposal, ed US Environmental Protection Agency, technology transfer, EPA 625/1-74-006, EUA (1974).
- 25.- Environmental Protection Agency, EPA, Process design manual for sludge treatment and disposal, ed US Environmental Protection Agency, technology transfer, EPA 625/1-79-011, EUA (1979).
- 26.- Environmental Protection Agency, EPA, Process design manual for dewatering of municipal wastewater sludge, ed US Environmental Protection Agency, technology transfer, EPA 625/1-87-014, EUA (1987).
- 27.- Environmental Protection Agency, EPA, Process design manual for land applications of municipal sludge, ed US Environmental Protection Agency, technology transfer, EPA 625/1-83-016, EUA (1983).
- 28.- Farrell, J B, Smith, J E, Hathaway, S W, y Dean, R B, "Lime stabilization of primary sludge", Journal of Water Pollution Control Federation, Vol. 46, EUA (1974), 113-122.
- 29.- Fisher, W J, "An economic assesment of some methods of sewage sludge stabilisation" (1983), en Sewage sludge stabilisation and disinfection, Bruce, A M (ed), Water Research Center/Ellis Horwood Limited, Gran Bretaña (1984), 343-368.
- 30.- Glysson, E A, Packard, J R, y Bornes C H, The problem of solid-waste disposal, College of Engineering The University of Michigan, Ann Arbor, EUA (1972).
- 31.- Godfree, A F, Jones, F, Satchwell, M, y Watson, D C, "The effectiveness of chemical disinfection on faecal bacterial in sludge", en Sewage sludge stabilisation and disinfection, Bruce, A M (ed), Water Research Center/Ellis Horwood Limited, Gran Bretaña (1984), 412-425.
- 32.- Gutiérrez, C, Fondo Nacional de Fomento al Turismo, FONATUR, comunicación personal (1991).

- 33.- Ham, O P, y Crespo, S R, Estudio comparativo de la aplicación de polímeros zwitteriónicos en el tratamiento de aguas, tesis de licenciatura, Facultad de Química, UNAM, México (1989).
- 34.- Hartman, R B, et al, "Sludge stabilization through aerobic digestion", Journal of Water Pollution Control Federation, Vol. 51, No. 4, EUA (1979), 2353-2359
- 35.- Havelaar, Ir A H, "Sludge disinfection-an overview of methos and their effectiveness", en Sewage sludge stabilisation and disinfection, Bruce, A M (ed), Water Research Center/Ellis Horwood Limited, Gran Bretaña (1984), 48-60.
- 36.- Hernández, C N, Comisión Nacional del Agua, CNA, Subgerencia de estudios y proyectos, Subdirección general de administración del agua, comunicación personal (1990).
- 37.- Hernández Muñoz, A, Depuración de aguas residuales, Servicio de publicaciones de la escuela de ingenieros de caminos de Madrid (UPM), España (1990).
- 38.- Journal American Water Works Association, JAWWA, Lime softening sludge treatment and disponsal, Comitee report, Vol. 21, EUA (1981), 600-608.
- 39.- Lawrence (1971) citado por Benefield, L D, y Randall, C W, Biological process design for wastewater treatment, Prentice-Hall inc., Englewood cliffs, EUA (1980).
- 40.- Lichtensteiger, Th, y Brunner, P H, "Transformation of sewage sludge in landfills" (1989) en Treatment of sewage sludge: thermophilic aerobic digestion and processing requirements for landfilling, Bruce, A M, Colin, F, y Newman, P J (eds), Elsevier applied science, Gran Bretaña (1989), 58 - 71.

- F
- 41.- Lohmann, J H, y Garber, W F, "Some recent developments in sewage sludge pumping", Water Science and Technology, Vol. 20, No. 4, Gran Bretaña (1988), 227-236.
 - 42.- Matsh, L C, y Drnevich, R F, "Autothermal aerobic digestion", Journal of Water Pollution Control Federation, Vol. 49, EUA (1977), 296-311.
 - 43.- Mavinic, D S, y Koers, D A, "Performance of kinetics of low temperature, aerobic sludge digestion", Jornal of Water Pollution Control Federation, Vol. 51, EUA (1979), 2088-2095.
 - 44.- Mejía, M E, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, SARH, comunicación personal (1990).
 - 45.- Metcalf y Eddy Inc., Wastewater engineering, treatment, disponsal and reuse, 2a. ed, McGraw-Hill, EUA (1980).
 - 46.- Morales, M R, Consideraciones geotécnicas y geohidrológicas para rellenos sanitarios, Memorias VI congreso nacional de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A.C., Sección V, Querétaro, México (1988)
 - 47.- Morgan, S F, Littlewood, M H, y Winstanley, R, "Aerobia thermophilic digestion of sludge using air" en Sewage sludge stabilisation and disinfection, Bruce, A M (ed), Water Research Center/Ellis Horwood Limited, Gran Bretaña (1984), 278-292.
 - 48.- Muñiz, R L, y Gutiérrez, R E, El composteo de lodos residuales como una alternativa para su aprovechamiento, Memorias 1er. simposio nacional sobre ingiería ambiental, México, (1988).
 - 49.- O'Rourke (1968) citado por Benefield, L D, y Randall, C W, Biological process design for wastewater treatment, Prentice-Hall inc., Englewood cliffs, EUA (1980).
 - 50.- Paulsrud, B, y Eikum, A S, "Experiences with lime stabilisation and composting of sewage sludge", (1983), en Sewage sludge stabilisation and

desinfection, Bruce, A M (ed), Water Research Center/Ellis Horwood Limited, Gran Bretaña (1984), 261-277.

- 51.- Paulsrud, B, y Eikum, A S, "Lime stabilisation of sewage sludge", Water Research, Vol. 9, Gran Bretaña (1975), 297-305
- 52.- Perry, R H, y Chilton, C H, Chemical engineering's handbook, Ed. Mc. Graw Hill, 5a. ed, EUA (1984).
- 53.- Preiss, W, "Thickening of surplus sludge by means of flotation", Water Science and Technology, Vol. 20, No. 4, Gran Bretaña (1988), 217-222.
- 54.- Qasim, S R, Wastewater treatment plants. Planning, design and operation, CBS College Publishing, Nueva York, EUA (1979).
- 55.- Ramalho, R S, Introduction to wastewater treatment processes, 2a. ed., Academic Press Inc., Nueva York, EUA (1983).
- 56.- Randall, C W, y Koch, C T, "Dewatering characteristics of aerobically digested sludge", Jornal of Water Pollution Control Federation, Vol. 41, EUA (1969), R215-R229.
- 57.- Rebhun, M, Zall, J, y Galil, N, "Net sludge solids yield as an expression of filterability for conditioner optimization", Journal of Water Pollution Control Federation, Vol. 61, No. 1, EUA (1989), 52-54.
- 58.- Reed, S C, Middlebrooks, E J, y Crites, R W, Natural systems for waste management and treatment, Ed. McGraw-Hill, EUA (1988).
- 59.- Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas, SAHOP, Desarrollo urbano. Plantas de tratamiento de aguas negras, Dirección general de ecología urbana, México (1979).
- 60.- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEDUE, Control de la contaminación de aguas en México, Dirección general de prevención y control de la contaminación ambiental, México (1988).

- 61.- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEDUE, Programa nacional de rehabilitación de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, Dirección general de prevención y control de la contaminación ambiental, México (1989).
- 62.- Secretaría de Recursos Hidráulicos, SRH, Sistemas económicos de tratamiento de aguas residuales adecuados a las condiciones nacionales, Dirección general de usos del agua y prevención de la contaminación, México (1974).
- 63.- Sedláček, M, Koubík, M, Vacek, K, y Rejholec, J, "Sludge treatment technology and ionizing radiation", Water Science and Technoly, Vol. 17, Gran Bretaña (1984), 551-562.
- 64.- Sorchini, P H, Departamento del Distrito Federal, DDF, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, comunicación personal (1990).
- 65.- Spinosa, L, Mininni, G, Barile, G, Lorè, F, y Ramadori, R, "Sludge treatment process with thermal conditioning", Water Science and Technology, Vol. 17, No. 6, Gran Bretaña (1985), 1375-1376.
- 66.- Streeter, V L, y Wylie, E B, Mecánica de fluidos, 6a. ed., Mc Graw Hill Inc., EUA (1975).
- 67.- Surucú, G A, Chain E S, y Engelbrecht, R S, "Aeorbic thermophilc treatment of high strength wastewaters", Journal of Water Pollution Control Federation, Vol. 48, No. 4, EUA (1976) 669-679.
- 68.- Ulrich, G D, Diseño y economía de los procesos de ingeniería química, Nueva editorial interamericana, S.A. de C.V., EUA (1986).
- 69.- Vesilind, P A, Hartman, G C, y Skene, E T, Sludge manegement and disponsal for practicing engineer, Lewis Publishers, Michigan, EUA (1986).

- 70.- Vesilind, P A, Treatment and disposal of wastewater sludge, 2a. ed., Ann Arbor Science, Michigan, EUA (1979).
- 71.- Vidales, A H, Diseño de la celda diaria en un relleno sanitario para desechos sólidos municipales, Memorias VI congreso nacional de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A.C., Sección V, Querétaro, México (1988).
- 72.- Water Pollution Control Federation, WPCF, O & M of trickling filters, RBC's and relative processes, Manual of practice OM-10 operation and maintenance series, Washington, EUA (1988).
- 73.- Water Pollution Control Federation, WPCF, Operation and maintenance of sludge dewatering systems, Manual of practice OM-8 operation and maintenance series, Washington, EUA (1987).
- 74.- Water Pollution Control Federation, WPCF, Sludge dewatering, Manual of practice 20, Washington, EUA (1983).
- 75.- Water Pollution Control Federation, WPCF, Sludge disinfection: a review of the literature, WPCF disinfection committee, Washington, EUA (1984).
- 76.- Water Pollution Control Federation, WPCF, Sludge stabilisation, Manual of practice FD-9 facilities development series, Washington, EUA (1985).
- 77.- Water Pollution Control Federation, WPCF, Sludge thickening, Manual of practice FD-1 facilities development series, Washington, EUA (1980).
- 78.- Westphal, A, y Christensen, G L, "Lime stabilization: effectiveness of two process modifications", Journal of Water Pollution Control Federation, Vol 55, EUA (1983), 1381-1387