

88  
2eq.



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Ingeniería

Propuesta de Tratamiento, Manejo y  
Disposición de Lodos Generados en los  
Procesos Biológicos del Tratamiento  
de las Aguas Residuales Municipales.

T E S I S  
Que para obtener el título de:  
INGENIERO CIVIL  
p r e s e n t a  
HUGO SANCHEZ PASTEN



Dirigida por:  
M. I. José María Martínez González

Ciudad Universitaria

1998

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

266624.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
FING/DCTG/SEA C/UTIT/066/98

Señor  
**HUGO SANCHEZ PASTEN**  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **M. L. JOSE MARIA MARTINEZ GONZALEZ**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

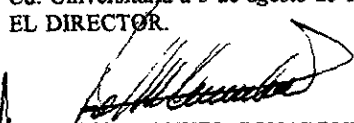
**"PROPUESTA DE TRATAMIENTO, MANEJO Y DISPOSICION DE LOS LODOS GENERADOS EN LOS PROCESOS BIOLÓGICOS DEL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES"**

- I. **INTRODUCCION**
- II. **SITUACION ACTUAL DEL MANEJO DE LODOS BIOLÓGICOS EN LA REPUBLICA MEXICANA**
- III. **ANTECEDENTES**
- IV. **ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO, MANEJO Y DISPOSICION DE LOS LODOS RESIDUALES**
- V. **APOYO DE LOS ASPECTOS TEORICOS DE LA INGENIERIA CIVIL PARA DETERMINAR LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCION DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE LODOS**
- VI. **PROPUESTA DE ACUERDO CON LAS NECESIDADES DE LA PLANTA**
- VII. **CONCLUSIONES**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria a 5 de agosto de 1998.  
EL DIRECTOR.

  
ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS  
JMCS/GMP\*lmf

A mis padres: Aurelio Sánchez Roa y Herlinda Pastén de Sánchez, con cariño y agradecimiento por su esfuerzo y ayuda para la realización de mis estudios.

A la Facultad de Ingeniería de la U.N.A.M., a quien debo mis estudios con eterno agradecimiento.

A mis hermanos, primos, tíos y abuelitos, por su apoyo, cariño e impulso para que concluyera la carrera de Ingeniería Civil.

Un agradecimiento especial al M.I. José María Martínez González por su valiosa ayuda en la realización de la presente Tesis.

**PROPUESTA DE TRATAMIENTO, MANEJO Y DISPOSICIÓN DE  
 LODOS GENERADOS EN LOS PROCESOS BIOLÓGICOS DEL  
 TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES.**

**Presenta: Hugo Sánchez Pastén**

**INDICE**

INTRODUCCION .....	INT-1
OBJETIVO.....	INT-3
<b>1. SITUACIÓN ACTUAL DEL MANEJO DE LODOS BIOLÓGICOS EN    LA REPÚBLICA MEXICANA .....</b>	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 INVENTARIO NACIONAL DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	2
1.2.1 Estrategias .....	3
1.3 CONDICIONES AGRESIVAS AL AMBIENTE DE LOS LODOS BIOLÓGICOS (IMPACTO AMBIENTAL).....	9
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>12</b>
2.1 ASPECTOS GENERALES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	12
2.2 PROCESOS BIOLÓGICOS.....	15
2.2.1 Procesos de tratamiento.....	18
2.3 PRODUCCIÓN DE LODOS BIOLÓGICOS.....	26
2.3.1 Sólidos del pretratamiento.....	27
2.3.2 Lodos primarios.....	27
2.3.3 Lodos secundarios.....	28
2.3.4 Lodos químicos.....	28
2.4 CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS.....	29
2.5 NORMATIVIDAD.....	32
2.5.1 Normatividad en materia de lodos biológicos.....	34
2.6 GENERALIDADES DEL MANEJO Y DISPOSICIÓN DE LODOS BIOLÓGICOS.....	36
2.7 INVESTIGACIONES, ESTUDIOS REALIZADOS EN MATERIA DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LODOS BIOLÓGICOS (IMTA, CNA, INST. DE INGENIERÍA, ETC.).....	37
<b>3. ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO, MANEJO Y DISPOSICIÓN DE    LOS LODOS RESIDUALES.....</b>	<b>40</b>
3.1 CONCENTRACIÓN.....	40

3.1.1	Espesamiento por gravedad.....	42
3.1.2	Espesamiento por flotación.....	43
3.2	<b>DIGESTIÓN.....</b>	<b>44</b>
3.2.1	Digestión anaerobia.....	44
3.2.2	Digestión aerobia.....	48
3.3	<b>ACONDICIONAMIENTO.....</b>	<b>49</b>
3.4	<b>DESHIDRATACIÓN Y SECADO.....</b>	<b>52</b>
3.4.1	Lechos de secado.....	53
3.4.2	Filtración al vacío.....	54
3.4.3	Centrifugación.....	56
3.4.4	Filtros prensa.....	59
3.4.5	Filtros de banda horizontales.....	59
3.5	<b>INCINERACIÓN.....</b>	<b>60</b>
3.6	<b>DISPOSICIÓN DE LODOS Y CENIZAS.....</b>	<b>61</b>
3.6.1	Relleno Sanitario.....	61
3.6.2	Uso como acondicionador de suelos.....	62
3.6.2.1	Composteo.....	62
3.6.3	Disposición sobre terrenos.....	64
3.6.4	Confinamiento controlado.....	65
<b>4.</b>	<b>APOYO DE LOS ASPECTOS TEÓRICOS DE LA INGENIERÍA CIVIL PARA DETERMINAR LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE LODOS.....</b>	<b>66</b>
4.1	CALIDAD DE LOS LODOS DESPUES DEL TRATAMIENTO.....	66
4.2	MANEJO HIDRÁULICO DE LOS LODOS.....	67
4.2.1	Pérdidas de carga en las conducciones de lodos.....	69
4.3	DISEÑO DE LAS ESTRUCTURAS DEL TREN DE TRATAMIENTO DE LODOS.....	71
4.3.1	Factores de carga.....	72
4.3.2	Factores de reducción de capacidad.....	73
4.4	SITIO PARA DISPOSICIÓN.....	73
4.4.1	Ubicación del sitio.....	73
4.4.2	Factores socioculturales.....	74
4.4.3	Aprovechamiento de los lodos.....	74
<b>5.</b>	<b>PROPUESTA DE ACUERDO CON LAS NECESIDADES DE LA PLANTA.....</b>	<b>76</b>
5.1	FACTORES A CONSIDERAR PARA EVALUAR LA ALTERNATIVA ADECUADA.....	76
5.1.1	Espesamiento por gravedad.....	77
5.1.2	Estabilización.....	77
5.1.3	Acondicionamiento para la deshidratación.....	78
5.1.4	Deshidratación.....	79
5.1.5	Recursos económicos.....	80
5.1.6	Propuesta de tratamiento.....	80

5.2 PROPUESTA DE DISPOSICIÓN.....	84
<b>6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>86</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>88</b>

## INTRODUCCIÓN

En México, el tratamiento de aguas residuales se lleva a cabo aún en baja escala, aunque se estima; de acuerdo con las Normas oficiales Mexicanas (NOM 001, 002 y 003) que a partir del año 2000 el tratamiento de éstas, será considerablemente en mayor escala. Sin embargo, sigue siendo importante considerar la generación inevitable de desechos secundarios que deben ser dispuestos de manera adecuada para evitar el deterioro del ambiente. El residuo de mayor volumen y cuyo tratamiento es más complejo, lo constituyen los lodos que son separados durante el proceso. Los lodos están formados principalmente por agua (95 a 99.5%) y contienen gran parte del material indeseable que es separado del agua residual, ya sea mediante procesos de separación física, biológica o por efecto de la precipitación química. Actualmente, se sabe que muy pocas plantas de tratamiento de aguas residuales de nuestro país, cuentan con instalaciones para el tratamiento de lodos, y que de éstas prácticamente ninguna opera regularmente (SEDUE, 1989).

La legislación vigente establece que los lodos generados durante el tratamiento biológico de aguas residuales, son considerados residuos peligrosos (DOF; NOM-ECOL-052/94). Sin proponer algún tratamiento, enfatiza en la importancia de tratar los residuos peligrosos de manera que se mitigue el peligro que representan para el ambiente. La problemática de la gestión del manejo y disposición de lodos se hace mayor; debido a que no existe una normatividad específica que regule el manejo, tratamiento y disposición final de éstos, además de otros factores como: la falta de recursos humanos con experiencia práctica, la poca información que se ha generado en el país al respecto y la falta de presupuesto, entre otros.

Los lodos biológicos residuales de cualquier efluente son recirculados al reactor biológico o bien deben seguir un manejo posterior de tratamiento en el que se permita disponerlos adecuadamente y con el menor costo posible. Bajo esta premisa se debe proponer un sistema que proporcione la mayor concentración de lodos durante su manejo para ahorrar equipos en el tren de tratamiento de lodo, con el fin de reducir costos de inversión, operación y mantenimiento.

El propósito de este trabajo es: revisar los conceptos teóricos básicos y los factores que influyen en la selección de un proceso de tratamiento de lodos biológicos, con el fin de proponer el tren que de la mejor alternativa acorde con las políticas ambientales y económicas de actualidad en el país.



El trabajo lo integran seis capítulos: en el capítulo primero se explica la situación actual del manejo de lodos biológicos en México, se hace énfasis en la problemática ambiental y se describe la legislación vigente en materia de manejo y disposición de lodos.

En el segundo capítulo se presentan los antecedentes en materia de tratamiento de aguas residuales haciendo referencia en los procesos biológicos y se describe la clasificación y características de los lodos biológicos, al final de éste se citan algunos de los estudios e investigaciones realizados sobre la problemática del manejo y disposición adecuada de lodos residuales.

En el tercer capítulo se describen las alternativas de tratamiento, manejo y disposición de lodos residuales, se citan datos referentes a la mejor operación en prácticas recientes y se describen ventajas y desventajas de alternativas seleccionadas.

En el cuarto capítulo se refiere al apoyo de los aspectos teóricos de la ingeniería civil para determinar los factores que influyen en la selección de un tren de tratamiento de lodos.

En el quinto capítulo se hace la propuesta en virtud de las alternativas analizadas por el capítulo anterior, se analizan los factores a considerar para evaluar la alternativa seleccionada y se hace la propuesta definitiva.

Finalmente en el capítulo seis, se presentan las conclusiones y recomendaciones, se concluye en cuanto a la problemática del tratamiento de aguas residuales, así como de las políticas ambientales y económicas de nuestro país.

## **OBJETIVO.**

Proponer el tren de tratamiento de lodos de exceso, que se generan en los procesos biológicos de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Asimismo sugerir la mejor alternativa, acorde con las políticas ambientales y económicas de actualidad en el país.

---

## CAPITULO 1

### SITUACIÓN ACTUAL DEL MANEJO DE LODOS BIOLÓGICOS EN LA REPÚBLICA MEXICANA.

#### 1.1 ANTECEDENTES.

La práctica del tratamiento de aguas residuales debe ser considerada como un aspecto de lo mas relevante dentro de las actividades del hombre, para salvaguardar su propia existencia, garantizar su desarrollo y mejorar su calidad de vida; de no prestar la atención debida, se presentarán y agudizarán alteraciones en el equilibrio ecológico natural, riesgos en la salud pública y desordenes de tipo social y económico, provocando daños que en un momento dado pueden ser irreversibles.

En México, con la implementación de programas de saneamiento, en paralelo con los de agua potable, se han intentado dar solución a esta problemática, la que se ha convertido en una demanda del tipo social prioritaria. Debido a que los recursos económicos y financieros no han sido suficientes, en la actualidad no se cuenta con una cobertura ideal, sin embargo, en los últimos diez años se han dado avances importantes en lo relativo al tratamiento de aguas residuales tanto industriales como municipales.

El saneamiento integral implica el análisis, evaluación e interrelación de varios factores para llegar a una solución, trátase de una región, cuenca ó sitio determinado, en el cual se involucra a dependencias y organismos federales, estatales y municipales, e incluye la participación de los sectores públicos y privados, por lo que constituye un interesante reto a vencer.

A medida que la población aumenta y desarrolla su economía, las demandas de agua siguen creciendo, en contraste con la oferta que proporciona el medio natural, la cual no puede crecer y al contrario, disminuye por las necesidades crecientes del vital liquido. En paralelo, con el desarrollo de la infraestructura hidráulica, se presenta el problema que implica el tratamiento y/o disposición de las aguas residuales utilizadas en las diversas actividades.

Se estima que en el país se consumen aproximadamente 240 m<sup>3</sup>/s (CNA,1997) de agua potable, misma que se emplea para diversos usos, en los diferentes sectores productivos, de este volumen, se genera un gasto de 170 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales de diferente calidad, que en la actualidad está alterando considerablemente las características de los cuerpos receptores, limitando sus usos.

## 1.2 INVENTARIO NACIONAL DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

La Comisión Nacional del Agua (C.N.A.), organismo descentralizado de la Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), es la única autoridad federal para administrar las aguas nacionales y tiene como atribución, expedir Normas Oficiales Mexicanas (NOM) en los términos de la ley federal sobre metrología y normalización, referente a la conservación, seguridad y calidad en la explotación, uso, aprovechamiento y administración de las aguas nacionales.

De acuerdo con el inventario nacional de las plantas de tratamiento, que actualiza sistemáticamente la CNA, hasta 1997 se tienen 808 plantas construidas con una capacidad instalada de 54,983 lps (tabla 1.1 y 1.2); de estas el 76% se encuentran en operación con un gasto de aproximadamente 35.3 m<sup>3</sup>/s. De los sistemas registrados en el inventario, se estima que el 60% opera con eficiencias bajas del 30 al 50% de remoción; el 35% operan con eficiencias del 50 al 80% y el 5% restante opera con eficiencias mayores al 80%.

Del total de plantas construidas, 193 no están en operación, debido a diferentes problemas, que resultan desde un diseño mal concebido; a veces por no considerar adecuadamente la información de la localidad o por falta de datos de campo, fallas en la construcción, abandono de las unidades de tratamiento, falta de recursos económicos y falta de personal especializado, hasta por problemas de carácter político. Si se compara la cantidad de agua residual municipal que en teoría se está tratando, se observa que del 35.3 m<sup>3</sup>/s y con la aportada a nivel nacional (estimada en 170 m<sup>3</sup>/s), significa que solo se trata el 21% del volumen total generado y el 31% del volumen total colectado. Estos últimos datos se incrementarán en un corto plazo, al 35 y 50% aproximadamente, al emprender programas de rehabilitación y ampliación de los sistemas actuales, a la puesta en marcha de nuevas plantas y a la construcción de otros sistemas de tratamiento en programa (CNA, 1997).

Dentro del panorama de los procesos utilizados en el tratamiento (tabla 1.3), el de lagunas de estabilización es el de mayor uso con un 51.48%, por las ventajas que representa por su bajo costo de operación y mantenimiento, además de que es una tecnología que permite el reuso del agua tratada en la agricultura, acuacultura y en la industria, también debido a su alta eficiencia en la remoción de microorganismos patógenos. En segundo término se utiliza el de lodos activados convencional, representando un 21.5%; y, en tercer lugar se encuentra el tanque imhoff (7.3%) y filtros biológicos (4%).

**TABLA 1.1 INVENTARIO NACIONAL DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES, (CNA, 1987).**

ESTADO	No DE PLANTAS CONSTRUIDAS	CAPACIDAD INSTALADA (LPS)	No DE PLANTAS OPERADAS	GASTO TRATADO (LPS)
AGUASCALIENTES	94	2462.00	79	1968.10
BAJA CALIFORNIA	10	2495.00	10	2755.00
BAJA CALIFORNIA SUR	18	1028.40	17	586.80
CAMPECHE	11	123.36	11	36.61
COAHUILA	13	912.50	7	675.00
COLIMA	23	487.00	16	304.20
CHIAPAS	6	108.72	0	0.00
CHIHUAHUA	18	1404.00	18	642.20
DISTRITO FEDERAL	24	5978.00	22	3379.00
DURANGO	43	2704.40	39	2047.00
GUANAJUATO	9	1665.00	2	790.00
GUERRERO	13	1829.00	13	1443.00
HIDALGO	5	148.36	1	14.88
JALISCO	69	3222.98	51	1726.01
ESTADO DE MEXICO	17	2580.00	17	1225.00
MICHOACAN	13	1224.00	10	531.00
MORELOS	30	1314.90	20	810.00
NAYARIT	48	1806.80	32	986.70
NUEVO LEON	28	8821.00	27	6002.00
OAXACA	22	755.74	17	313.10
PUEBLA	11	339.40	8	173.90
QUERETARO	13	834.20	12	298.20
QUINTANA ROO	14	1188.00	12	790.91
SAN LUIS POTOSI	12	423.00	4	265.00
SINALOA	15	1031.00	10	1030.00
SONORA	64	2394.70	46	1432.70
TABASCO	23	1068.20	19	843.50
TAMAULIPAS	14	2148.00	11	1719.10
TLAXCALA	33	878.80	23	679.22
VERACRUZ	61	3331.00	43	1694.00
YUCATAN	8	29.3	8	14.50
ZACATECAS	26	247.00	10	164.00
NACIONAL	808	54983.76	615	35340.63

TABLA 1.2 INVENTARIO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES EN OPERACION, CAUDAL POR PROCESO, (CNA, 1997).

ESTADO	AE		DB		FB		LA		LB		LE		LM		LP		PE		RA		TI		TP		TS		TV		ZO		ZZ		AN		TOTAL Q(LPS)			
	No	Q	No	Q	No	Q	No	Q	No	Q	No	Q	No	Q	No	Q	No	Q	No	Q	No	Q	No	Q	No	Q	No	Q	No	Q	No	Q	No	Q				
AGS	1	1600	2	120	72	185.9																																1049
BUC	2	129	1	200	1	750	5	1538																													2755	
BUS	6	446.5	7	19.2																																	568.8	
CAMP	3	19.2																																			36.61	
COAH	3	43.6																																			67.5	
COL	1	200																																			304.2	
CHIS	4	467																																			847.2	
CHIH	1	5																																			18	
DF	2	810	19	5263																																	3319	
DGO	1	15																																		52		
GTO	1	250																																		790		
GRO	12	593																																		2		
HGO	2	140	10	492.5	2	54	22	340.5																													14.68	
JAL	1	805	1	324																																1		
MEX	1	80																																		17		
MOR	3	368	4	354																																	51	
NAY	3	3480																																			1726.01	
NLD	1	6																																		17		
OAX	2	142.5	1	169																																	17	
PUE	2	127																																			17	
QRO	1	80																																		17		
SRO	2	127																																			17	
SLP	2	80																																			17	
SIN	2	80																																			17	
SON	4	1432.7																																				17
TAB	1	75	3	80																																	17	
TAMP	1	111.1																																			17	
TLAX	3	1212	17	256																																	17	
VER	3	1212	17	256																																	17	
YUC	1	2																																			17	
ZAC	2	72	1	2																																	17	
NACIONAL	6	5615	9	655	23	4635.6	131	6618.2	13	3684.2	334	7655.8	1	26	3	259	7	4.8	5	123	26	407	14	1665	12	87.7	0	0	16	1468	1	8	14	453	615	35340.63		

ZO= ZANJA DE OXIDACION  
 ZZ= DESCONOCIDO  
 AN= ANAEROBIO

LP= LAGUNAS PANTANO  
 PE= PURIFICADO ENZIMATICO  
 RA= RAFA  
 TI= TANQUE IMHOFF  
 TP= TRATAMIENTO PRIMARIO  
 TS= TRATAMIENTO SECUNDARIO  
 TV= TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO

AE= AERACION EXTENDIDA  
 DB= DISCOS BIOLÓGICOS  
 FB= FILTROS BIOLÓGICOS  
 LA= Lodos Activados  
 LB= LAGUNAS AERADAS  
 LE= LAGUNAS DE ESTABILIZACION  
 LM= LEMNA

SIMBOLOGÍA:

TABLA 1.3 INVENTARIO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES EN CONSTRUCCION Y PROYECTO, (CNA, 1997).

ESTADO	AE	DB	FB	LA	LB	LE	LM	LP	PE	RA	TI	TP	TS	TV	ZO	ZZ	AN	TOTAL
AGUASCALIENTES			1	2		83			8									94
BAJA CALIFORNIA			2	1	1	5									1			10
BAJA CALIFORNIA SUR				7		9	1					1						18
CAMPECHE				7								3					1	11
COAHUILA			2	5		4					1	1						13
COLIMA			1	2		20												23
CHIAPAS						5							1					6
CHIHUAHUA			1	4		12									1			18
DISTRITO FEDERAL	1		2	20												1		24
DURANGO				1	1	41					3				1			43
GUANAJUATO				1	1	3											9	9
GUERRERO				12								1						13
HIDALGO			1			2		1			1							5
JALISCO			2	11	2	34				1	7	1	2		9			69
ESTADO DE MEXICO			1	1		15					3				1			17
MICHOACAN			1			6												13
MORELOS			3	5	3	2				4	8					2	3	30
NAVARRIT			4	11		19							14					48
NUEVO LEON	3		1	6	3	12				1	2						1	28
OAXACA			1	1	10	5		3			2	2		1	1			22
PUEBLA			2			6												11
QUERETARO	1		3	1					3		1	1			1		2	13
QUINTANA ROO				12		1												14
SAN LUIS POTOSI				9		3												12
SINALOA				2		12						1						15
SONORA						61				2	1							64
TABASCO			1	4		7				10					1			23
TAMAUlipAS	1		1		1	6					3				2			14
TLAXCALA			1		4	27				1								33
VERACRUZ			3	22		10			1	2	16	3	1				3	61
YUCATAN			1	2													5	8
ZACATECAS	2		9	17		6												26
NACIONAL	6	9	32	174	14	416	1	4	12	10	59	15	18	1	19	3	15	808

SIMBOLOGIA:

AE= AERACION EXTENDIDA  
 DB= DISCOS BIOLÓGICOS  
 FB= Filtros BIOLÓGICOS  
 LA= LAGUNAS AERADAS  
 LE= LAGUNAS DE ESTABILIZACION  
 LM= LEMNA

LP= LAGUNAS PANTANO  
 PE= PURIFICADORE ENZIMATICO  
 RA= RAFA  
 TI= TANQUE IMHOFF  
 TP= TRATAMIENTO PRIMARIO  
 TS= TRATAMIENTO SECUNDARIO  
 TV= TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO

ZO= ZANJA DE OXIDACION  
 ZZ= DESCONOCIDO  
 AN= TRATAMIENTO ANAEROBIO

Con anterioridad los procesos de tratamiento se elegían en función de las condiciones particulares de descarga que generalmente eran rigurosas de la: inversión inicial, disponibilidad de terreno; costos y ventajas en la operación y mantenimiento, entre otros factores. En la actualidad, debido a la legislación vigente, que se tiende a hacerlas más flexibles, se está tendiendo a apoyar las obras marcando plazos para el cumplimiento de las normas y permitiendo la construcción por módulos de los sistemas de tratamiento seleccionados.

Actualmente se encuentran en proceso constructivo 105 plantas de tratamiento (tabla 1.4), con una capacidad de 8,118.34 lps, lo que significa a corto plazo, una cobertura complementaria del 4.79%.

TABLA 1.4 INVENTARIO NACIONAL DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES EN CONSTRUCCIÓN Y PROYECTO (CNA, 1997)

ESTADO	No DE PLANTAS TOTAL	GASTO TOTAL (LPS)	No DE PLANTAS EN CONSTRUCCION	GASTO DE DISEÑO (LPS)	No DE PLANTAS EN PROYECTO	GASTO DE DISEÑO (LPS)
AGUASCALIENTES	S/D					
BAJA CALIFORNIA	4	3820.00	2	1440.00	2	2380.00
BAJA CALIFORNIA SUR	2	52.00	0	0.00	2	52.00
CAMPECHE	S/D					
COAHUILA	13	4370.00	0	0.00	13	4370.00
COLIMA	2	1050.00	1	300.00	1	750.00
CHIAPAS	42	2098.07	6	178.80	36	1819.27
CHIHUAHUA	42	9509.00	17	139.00	25	9370.00
DISTRITO FEDERAL	5	35875.00	4	875.00	1	35000.00
DURANGO	25	639.60	14	74.60	11	565.00
GUANAJUATO	12	5705.00	1	70.00	11	5635.00
GUERRERO	3	312.00	2	228.00	1	84.00
HIDALGO	S/D					
JALISCO	4	2957.00	0	0.00	4	2957.00
ESTADO DE MEXICO	17	955.00	6	458.00	11	497.00
MICHOACAN	16	1970.00	4	851.00	12	1119.00
MORELOS	8	405.00	1	75.00	7	330.00
NAYARIT	20	337.44	7	60.60	13	276.84
NUEVO LEON	19	505.00	0	0.00	19	505.00
OAXACA	18	952.50	8	72.60	10	879.90
PUEBLA	24	4043.60	4	192.00	20	3851.60
QUERETARO	19	914.00	18	828.00	1	86.00
QUINTANA ROO	S/D					
SAN LUIS POTOSI	9	1884.30	1	10.00	8	1874.30
SINALOA	9	6699.00	0	0.00	9	6699.00
SONORA	3	4000.00	0	0.00	3	4000.00
TABASCO	S/D					
TAMAULIPAS	8	3519.24	2	27.00	6	3492.24
TLAXCALA	6	52.09	1	3.74	5	48.35
VERACRUZ	17	3653.00	6	2235.00	11	1418.00
YUCATAN	S/D					
ZACATECAS	15	449.00	0	0.00	15	449.00
NACIONAL	362	96726.84	105	8118.34	257	88608.50

Paralelo a la operación de las plantas de tratamiento, se presenta el problema del manejo y disposición final de los lodos, subproducto del proceso, que sin analizar su calidad y sin importar las repercusiones que puedan provocar



---

al ambiente, se disponen en forma cruda o semitratada en tiraderos a cielo abierto y, en algunos casos, en rellenos sanitarios. Anteriormente, su tratamiento no se había tomado en consideración debido a que repercute significativamente en el costo global del tratamiento del agua residual, sin embargo, dentro del marco de legislativo que emiten las Leyes: de Aguas Nacionales y del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, se considera la prevención de la contaminación del medio ambiente promoviendo el tratamiento de lodos y la disposición sanitaria de este subproducto.

### **1.2.1 Estrategias**

Conscientes de que las aguas residuales representan un recurso renovable, debido a que después de ser tratadas pueden ser empleadas para satisfacer las necesidades industriales, agrícolas y municipales secundarias, así como para la recarga de acuíferos, a corto, mediano y largo plazo, y que el saneamiento se vuelva prioritario en zonas de probable conflicto, como son las regiones turísticas, fronterizas y con sequía extrema, es menester implementar e implantar planes y programas de acción, en coordinación con los gobiernos estatales y municipales, para dar solución a la problemática en forma integral.

Dentro de las estrategias y políticas para el manejo del agua, se persigue el conservar el equilibrio de los cuerpos de agua y, a la vez, aprovechar adecuadamente el recurso en las actividades agrícolas, domésticas, industrial, generación de energía eléctrica, recreación, turismo, acuacultura, pesca y navegación para favorecer el tránsito al desarrollo sustentable. Para cumplir con lo anterior, el Programa Hidráulico 1995-2000 contempla varias líneas de acción, de las cuales se citan las siguientes:

1. Modernización de los sistemas de recopilación y manejo de la información para obtener la precisión y exactitud necesarias para la planeación cuya actividad será manejada dentro del Programa de Modernización del Manejo del Agua (PROMMA), a cargo de la CNA.
2. En las zonas rurales, rehabilitación de los sistemas de agua potable y saneamiento en coordinación con los gobiernos estatales y municipales así como el apoyo de la organización de los propios usuarios para que operen los sistemas.
3. En las zonas urbanas otorgan subsidios a través del Programa de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento en Zonas Urbanas (APAZU), cuando este sea financiado con mezcla de recursos y formen parte de un plan maestro.
4. Se apoyará a los municipios y organismos operadores en aspectos técnicos y administrativos y se creará un ambiente financiero sano que favorezca la participación privada bajo diferentes modalidades.
5. Se apoyará la rehabilitación de los sistemas de agua potable y saneamiento en comunidades rurales.

6. Se impulsará el diseño, construcción y operación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales en ciudades medias a través de esquemas de conversión o concesión con la iniciativa privada.
7. Se inspeccionará a los usuarios responsables de descargas de aguas residuales con y sin tratamiento para asegurar el cumplimiento de la calidad de las descargas, y en su caso el tratamiento y la disposición adecuada de los lodos biológicos generados.
8. Se coordinarán acciones de vigilancia con la procuraduría federal de protección al ambiente y el instituto de ecología para disponer apropiadamente el agua y lodos tratados.
9. Se llevarán a cabo acciones de coordinación con las instancias federales, estatales y municipales para apoyar los programas de las localidades ubicadas en las 15 cuencas prioritarias y se vigilará el cumplimiento de las normas de descarga de aguas residuales municipales en estas 15 cuencas y en los programas regionales destinados por la SEMARNAP.
10. Se apoyará a la secretaría de salud, DIF, SEP, y autoridades municipales y estatales en programas de cuidado a la salud pública y medio ambiente relacionados con el agua.
11. Se dará solución integral al tratamiento de los 42 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales que genera la zona metropolitana, mediante el Programa de Saneamiento del valle de México a cargo de la CNA.
12. Se instrumentará el Programa Frontera XXI, que coordina la SEMARNAP abarcando a todos los estados que comparten la frontera con los Estados Unidos de Norteamérica.

### **1.3 CONDICIONES AGRESIVAS AL AMBIENTE OCASIONADAS POR LA MALA DISPOSICION DE LOS LODOS BIOLÓGICOS (IMPACTO AMBIENTAL).**

Los contaminantes del agua residual quedan contenidos en su mayor parte en los lodos de los sedimentadores primarios y secundarios. Estos contaminantes hacen que los lodos sean un material con características potenciales de residuo peligroso para el medio natural y la salud pública; por lo tanto es necesario su tratamiento para facilitar su manejo y evitar en lo posible el peligro de infecciones y que cause efectos adversos al ambiente.

Los problemas de contaminantes más importantes en el lodo son: presencia potencial de organismos patógenos, principales causantes de un sin número de enfermedades en el hombre y la concentración de metales pesados, los cuales son acumulables y fitotóxicos. En la tabla 1.5 se presentan algunos de los patógenos que comúnmente se encuentran en las aguas residuales y lodos de las mismas y las enfermedades que provocan.

TABLA 1.5 ORGANISMOS PATÓGENOS EN LA RED DE ALCANTARILLADO Y EN SÓLIDOS DEL LODO ( National Research Council, 1996)

ORG. PATOGENO	EJEMPLOS	ENFERMEDADES
Bacteria	Shigella sp. Salmonella sp. Salmonella typhi Vidrio cholerae Enteropathogenic Escherichia coli Yersinia sp. Campylobacter jejuni	Disenteria Salmonelosis (gastroenteritis) Fiebre tifoidea Colera  Enfermedades gastrointestinales Yersiniosis (gastroenteritis) Campilobacterosis (gastroenteritis)
Virus	Hepatitis virus A Norwalk Virus Rotovirus Polivirus Coxsackie virus Echovirus	Hepatitis infecciosa Gastroenteritis aguda Gastroenteritis aguda Poliomielitis Dolores de cabeza y musculares Hepatitis, diarrea
Protozoarios	Entamoeba histolitica Giardia Lamblia Cryptosporidium sp. Balantidium coli	Ambiasis (disenteria amoebica) Giardiasis (gastroenteritis) Cryptosporidiosis (gastroenteritis) Balantidiasis (gastroenteritis)
Helmintos	Ascaris sp. Taenia sp. Necator americanus Trichuris trichuria	Ascariis Taeniasis Anquilostomiasis Trichuriasis

Las condiciones que se deben dar para crear una infección por lodo son: 1) que el agente infeccioso este presente, 2) éste deba encontrarse en concentraciones suficientes y 3) que el individuo susceptible de infección entre en contacto con el agente infectante.

Las concentraciones de organismos patógenos se reducen según el tipo de tratamiento que reciben tanto el agua como el lodo. La tabla 1.6 indica la disminución en la concentración de organismos en cada etapa de tratamiento del agua y del lodo.

Si bien es cierto que el lodo biológico es un residuo rico en materia orgánica y mejora la condiciones físicas del suelo, cuando es utilizado junto con fertilizantes complementarios para satisfacer la deficiencia de algún nutriente, puede causar la concentración excesiva de otros nutrientes. Esto es, la adición excesiva al suelo de nitrógeno tanto por el lodo como los fertilizantes causa una

lixiviación de especies de nitrógeno soluble bajo la superficie. El transporte de nitratos de la zona vadosa al agua subterránea incrementa la concentración de nitratos en los acuíferos, produciendo un peligro potencial para los consumidores de esta agua.

TABLA 1.6 VALOR MEDIO DE MICROORGANISMOS ENCONTRADOS EN LAS DIFERENTES ETAPAS DEL TRATAMIENTO DE AGUAS Y LODO ( National Research Council, 1998)

Microorganismos	NUMERO DE MICROORGANISMOS POR 100 ML DE AGUA DEL EFLUENTE				No DE MICROORG. /GR LODO	
	Red de alcantarillado	Tratamiento primario	Tratamiento secundario	Tratamiento terciario <sup>a</sup>	Crudo	Digerido
Coliformes fecales NMP <sup>c</sup>	1.0x10 <sup>9</sup>	1.0x10 <sup>7</sup>	1.0x10 <sup>6</sup>	<2	1.0x10 <sup>7</sup>	1.0x10 <sup>6</sup>
Salmonella NMP	8,000	800	8	<2	1,800	18
Shigella NMP	1,000	100		<2	220	3
Virus UPF <sup>d</sup>	50,000	15,000	1,500	0.002	1,400	210
Huevos de helminto	800	80	0.08	<0.08	30	10
Giardia Lambia	10,000	5,000	2,500	3	140	43

<sup>a</sup> Incluye coagulación, sedimentación, filtración y desinfección  
<sup>b</sup> Digestión anaerobia mesofílica  
<sup>c</sup> NMP= Número más probable  
<sup>d</sup> UPF= Unidades de plaquetas formadas

La presencia de metales pesados en el lodo, como las sales de cadmio, cobre, níquel y zinc pueden ser fitotóxicos y acumularse en el suelo a niveles críticos. Estos elementos traza y PCB's pueden causar serios problemas al suelo, ya que inhiben la actividad biológica, además de perjudicar la salud de quienes consumen productos que han sido cosechados en tierras que utilizan este tipo de lodo. Si estos constituyentes no son inmovilizados en la superficie del suelo, estos pueden llegar por diferentes mecanismos de transporte a zonas profundas lixiviándose, y llegando a contaminar el suelo y el agua subterránea.

Colín (1986) encontró en los lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de Lerma estado de México, niveles de Cromo VI, Zinc, Níquel y Plomo, de 1235, 552, 26 y 753 ppm respectivamente. En estudios recientes en la misma planta los resultados fueron significativamente más bajos para el Plomo (0.078 ppm), el Cromo (0.224 ppm) y el Níquel (0.094).

---

En general, el potencial de riesgo ambiental de lodo se puede disminuir, dándole un tratamiento de estabilización antes de ser dispuesto al medio, además de que facilita su manejo para las etapas posteriores de tratamiento. Por otro lado cuando la concentración de metales pesados en el lodo es alta, éste debe manejarse como un residuo peligroso, ya que ningún tratamiento de estabilización garantiza la reducción de estos constituyentes y son necesarios confinamientos especiales para su disposición final.

## CAPITULO 2

### ANTECEDENTES.

#### 2.1 ASPECTOS GENERALES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

Una planta de tratamiento para aguas residuales municipales puede definirse como:

"El conjunto de obras o estructuras con sus equipos y dispositivos hidráulicos, mecánicos, eléctricos o de otros tipos, en donde las aguas residuales se someten a diversas operaciones o procesos unitarios con el fin de mejorar su calidad para reutilizarlas o descargarlas al ambiente con un cierto grado de calidad"

Con base en el grado de calidad que se pretenda lograr, los procesos de tratamiento se clasifican de manera convencional y sus fundamentos importantes se basan en los procesos biológicos.

Como ya se mencionó; el objetivo principal de los procesos de tratamiento de aguas residuales, es la eliminación de sustancias contaminantes. Estas sustancias pueden ser eliminadas haciéndolas reaccionar con otras sustancias, a fin de obtener productos de fácil remoción, o bien, por lo menos de minimizar la actividad nociva. En otros casos, las sustancias que se agregan pueden tener como finalidad obtener agua con características deseables.

Los procesos empleados para el tratamiento de aguas residuales, dependen considerablemente del tipo de reuso o disposición que se le dará al efluente tratado, estos procesos pueden ser desde los más simples; cuando se trate de agua para alimentar lagos, hasta un tratamiento avanzado que elimine cualquier tipo de impurezas contenidas en el agua; cuando ésta sea destinada para el consumo humano.

La selección de los procesos de tratamiento depende de la calidad de agua a obtener, así como también del caudal a tratar y de la disponibilidad del terreno a ocupar, por lo que; las unidades de tratamiento resultan ser muy variables y puede lograrse por medios naturales, físicos, químicos y biológicos.

Los métodos usuales están clasificados como operaciones unitarias físicas, procesos unitarios químicos y procesos unitarios biológicos, estas operaciones y procesos pueden presentarse en una variedad de combinaciones en el tren de tratamiento. Los niveles de tratamiento se pueden agrupar como: a) tratamiento

---

nulo (procesos naturales), b) tratamiento preliminar o preparatorio, c) tratamiento primario (procesos físicos), d) tratamiento secundario (procesos biológicos) y e) tratamiento terciario (procesos químicos). Se describen a continuación:

a) Tratamiento nulo o natural.

La naturaleza provee cierto grado de autopurificación a todas las aguas que hayan sido contaminadas por desechos, ya sea debido a escurrimientos superficiales, descargas de aguas residuales municipales o residuos líquidos industriales. La velocidad a la que se verifica este proceso depende de la naturaleza del material contaminante, así como de las condiciones y características físicas, químicas y biológicas del agua misma. Los factores que influyen en la autodepuración de los cuerpos receptores son: el más importante el tiempo, las condiciones adecuadas de temperatura, la luz solar, la velocidad de flujo y muchas otras características físicas, químicas y biológicas, que ocurren en forma natural como la fotosíntesis, aereación, dilución, sedimentación, vida acuática (plantas y animales), entre otras, en fin todo aquello que no permita el abatimiento del oxígeno disuelto en el agua como elemento de vital importancia.

Anteriormente el poder de autodepuración de los cuerpos de agua era el tratamiento utilizado y era suficiente, pero en la actualidad debido a los grandes volúmenes de agua contaminada que se descargan en los cauces, hace que esta posibilidad sea insuficiente y por lo tanto una alternativa desechada, puesto que es tan alta la concentración de contaminantes que se vierten y son tantos los puntos de vertido, que imposibilitan a la corriente a poder autodepurarse ocasionando con ello que los cauces se convierten en grandes drenajes.

b) Tratamiento preliminar o preparatorio.

Consiste en mejorar la calidad física de las aguas residuales, mediante la remoción de los sólidos flotantes o de los sólidos suspendidos de tamaño relativamente grande. Como ejemplos de tratamiento preliminar se tienen: el cribado o sea el pasar el agua residual por rejas o rejillas de diferentes tamaños, el desarenado, la igualación de gastos, el desmenuzado, etc.

c) Tratamiento primario.

Se refiere a la remoción de la mayor parte de los sólidos en suspensión contenidos en las aguas residuales, por medio de procesos físicos conocidos como operaciones unitarias físicas. Este tipo de remoción puede o no, según el caso, estar acompañado del tratamiento de los lodos obtenidos con la remoción mencionada. Como ejemplos de tratamiento primario se tienen: regulación de flujo, neutralización y mezclado, desgrasado, sedimentación primaria (tanques

sépticos, tanques de doble acción, tanques de sedimentación simples y tanques de sedimentación compuesta).

d) Tratamiento secundario.

Consiste en la separación (a un alto grado) de los sólidos orgánicos disueltos contenidos en las aguas residuales. Generalmente los tratamientos secundarios son aquellos en los cuales la remoción de contaminantes es por medio de la actividad biológica, aunque también existen algunos procesos físicos que se realizan después de los procesos biológicos.

El tratamiento secundario depende principalmente de los organismos para la descomposición de los sólidos orgánicos, hasta transformarlos en sólidos inorgánicos o en aquellos sólidos orgánicos estables. Este tratamiento es comparable a la zona de recuperación de una corriente natural, en la figura 2.1 se pueden observar las partes que componen a un tren de tratamiento completo, en el cual se integra el tratamiento biológico o tratamiento secundario como el principal elemento del proceso completo de tratamiento de aguas residuales.

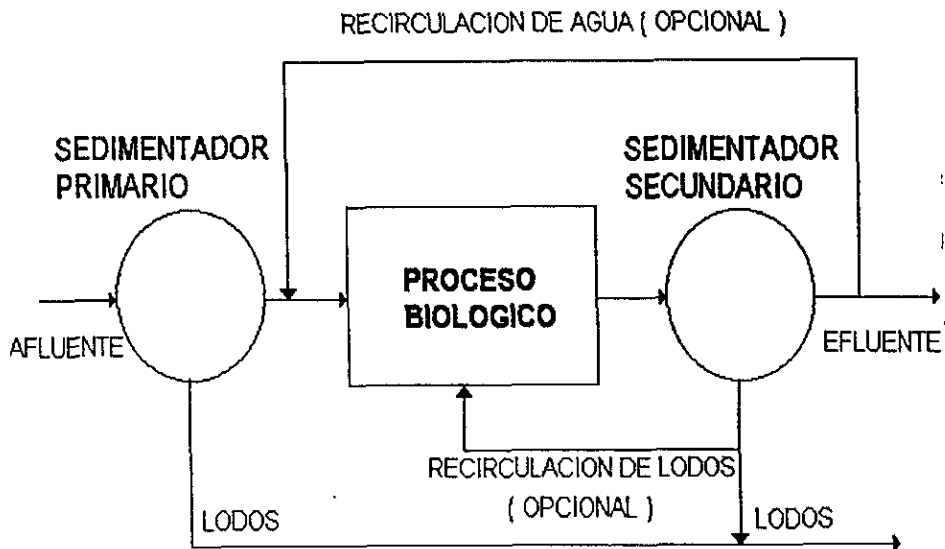


DIAGRAMA GENERAL  
DEL  
TRATAMIENTO SECUNDARIO

FIGURA 2.1 DIAGRAMA GENERAL DEL TRATAMIENTO SECUNDARIO; (ASCE, 1993).



---

### e) Tratamiento terciario o avanzado.

Se refiere a la remoción de contaminantes, mediante procesos fisicoquímicos, estos contaminantes suelen ser materiales en suspensión muy fina (principalmente coloides) o de inorgánicos en solución. Este proceso puede consistir en una serie compleja de varios procesos independientes, de acuerdo con la calidad de las aguas residuales por tratar y fundamentalmente a la calidad requerida en el agua tratada. Estos procesos generalmente van acompañados, tanto por operaciones unitarias físicas como por procesos unitarios biológicos.

Como ejemplos de tratamiento terciario se tienen:

- \* Coagulación y floculación,
- \* Adsorción con carbón activado,
- \* Intercambio iónico,
- \* Ósmosis inversa,
- \* Cloración al punto de ruptura,
- \* Desorción de amoníaco,
- \* Desinfección,
- \* Electrodialisis,
- \* Oxidación química, entre otros.

## 2.2 PROCESOS BIOLÓGICOS.

El tratamiento biológico de las aguas residuales, tiene como finalidad: a) remover la materia orgánica en estado coloidal y disuelta que no fue removida en el tratamiento primario y b) estabilizar la materia orgánica.

En forma general, el tratamiento biológico se lleva a cabo por la transferencia de la materia orgánica hacia la película o "Floc" (también llamado biomasa), por contacto interfacial, adsorción y absorciones asociadas. La materia orgánica es utilizada por los microorganismos para su metabolismo y generación de células nuevas, las células viejas mueren, deslavándose y precipitándose al fondo.

En los sistemas biológicos, se tienen complejas poblaciones de microorganismos, mezclados e interrelacionados, en los que cada uno de ellos tiene su propia curva de crecimiento, la cual depende de las condiciones del sistema, pH, temperatura, aereación o anoxicas y disposición de nutrientes.

Es importante conocer si el agua residual a tratar por medios biológicos contiene compuestos químicos tóxicos que puedan ser inhibitorios para el crecimiento de los microorganismos, en tal caso se podría hacer un pretratamiento para su eliminación o mejor cambiar a un tratamiento fisicoquímico.

En condiciones aerobias, los microorganismos utilizan el oxígeno en sus procesos vitales (metabolismo y reproducción), en cambio en ausencia de oxígeno (anaerobiosis) se usan otros compuestos químicos en sustitución del oxígeno como aceptores de electrones.

Los procesos biológicos para el tratamiento de las aguas residuales, constan de equipo que pone en contacto la materia orgánica con los microorganismos adecuados, durante el tiempo suficiente para llevar a cabo su oxidación, bajo condiciones aerobias o anaerobias. Los principales microorganismos responsables de remover grandes cantidades de materia orgánica en los procesos biológicos aerobios, son las bacterias, en su mayoría aerobias y facultativas heterótrofas. Pruebas realizadas sobre un número diferente de bacterias indican que están constituidas por aproximadamente 80 por ciento de agua y 20% de material seco, del cual 90 por ciento es orgánico y 10 por ciento inorgánico, una fórmula aceptada para la materia orgánica es  $C_5H_7O_2N$ , del cual 53 por ciento de peso seco es carbono.

Además de la fuente de carbono orgánico y la presencia de oxígeno, principales abastecedores de carbono y energía para la síntesis y mantenimiento de funciones, debe haber elementos inorgánicos como nitrógeno y fósforo, y trazas de elementos como azufre, potasio, calcio, y magnesio, que son vitales para la síntesis celular.

En presencia de oxígeno, la oxidación aeróbica toma lugar; parte de la materia orgánica es sintetizada a nuevos microorganismos, otra parte es oxidada a productos finales relativamente estables como  $C_2$ ,  $H_2O$  y  $NH_3$ , y en ausencia de materia orgánica las mismas células o microorganismos entran en una etapa endógena para obtener la energía necesaria para el mantenimiento de sus funciones. En la mayoría de los tratamientos biológicos estos tres procesos ocurren simultáneamente. Para un proceso aerobio y considerando a las bacterias como la población dominante (ver tabla 2.1), los tres procesos anteriores pueden representarse de la siguiente manera:

Oxidación:  $COHNS + O_2 + \text{bacterias} \rightarrow CO_2 + NH_3 + \text{otros productos finales} + \text{energía}$

Síntesis:  $COHNS + O_2 + \text{bacterias} \rightarrow \text{energía} + C_5H_7NO_2$

Respiración endógena:  $C_5H_7NO_2 + 5O_2 \rightarrow 5CO_2 + NH_3 + 2H_2O + \text{energía}$

Los procesos biológicos también se conocen como procesos unitarios biológicos, y son el elemento fundamental del reactor biológico, donde se lleva a cabo la conversión de los contaminantes solubles en sólidos biológicos y en otros productos del metabolismo microbiano.

TABLA 2.1 CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS MICROORGANISMOS CON BASE EN SUS FUENTES DE CARBÓN Y ENERGÍA

CLASIFICACIÓN	FUENTE DE ENERGÍA	FUENTE DE CARBÓN	ORGANISMOS REPRESENTATIVOS
FOTOAUTOTROFOS	LUZ	CO <sub>2</sub>	Algas, bacterias, fotosintéticas, plantas superiores
FOTOHETEROTROFOS	LUZ	Materia orgánica	Bacterias fotosintéticas
QUIMIOAUTOTROFOS	Materia inorgánica (oxidación-reducción)	CO <sub>2</sub>	Bacterias
QUIMIOHETEROTROFOS	Materia orgánica (oxidación-reducción)	Materia orgánica	Bacterias, hongos, protozoarios, animales

## Definiciones

Los términos que se definen en lo que sigue son de gran utilidad para comprender los conceptos del tratamiento biológico:

*Proceso Aerobio.* Son los procesos de tratamiento biológico que se dan en presencia de oxígeno. Aquellas bacterias que pueden sobrevivir únicamente en presencia de oxígeno disuelto se conocen como aerobias obligadas (restringidas a una condición específica de vida).

*Proceso Anaerobio.* Son los procesos de tratamiento biológico que se dan en ausencia de oxígeno. Las bacterias que pueden sobrevivir solamente en ausencia de oxígeno disuelto se conocen como anaerobias obligadas .

*Desnitrificación Anóxica.* Es el proceso por el cual el nitrógeno de los nitratos se transforma biológicamente en nitrógeno gas en ausencia de oxígeno. Este proceso se conoce también como desnitrificación anaerobia.

*Procesos Facultativos.* Son los procesos de tratamiento biológico en los que los organismos responsables de ellos son indiferentes a la presencia del oxígeno disuelto. Estos organismos se conocen como organismos facultativos.

*Microaerofilos.* Son un grupo de microorganismos que crecen mejor en presencia de bajas concentraciones de oxígeno.

*Eliminación de la DBO carbonosa.* Es la conversión biológica de la materia orgánica carbonosa del agua residual en tejido celular y diversos productos gaseosos. En la conversión se supone que el nitrógeno presente en los diversos compuestos se convierte en amoníaco.

*Nitrificación.* Es el proceso biológico de dos etapas por el cual el amoníaco se transforma primero en nitrito y luego en nitrato.

**Desnitrificación.** Es el proceso biológico por el que el nitrato se convierte en gas nitrógeno y otros productos gaseosos.

**Estabilización.** Es el proceso biológico en el que la materia orgánica de los lodos producidos en la decantación primaria y en el tratamiento biológico del agua residual se estabiliza, generalmente por conversión en gases y en tejido celular. Según se lleve a cabo la estabilización, bajo condiciones anaerobias o aerobias, el proceso se conoce como digestión anaerobia o aerobia.

**Sustrato.** Es el término utilizado para representar la materia orgánica o los nutrientes que sufren una conversión o que pueden constituir un factor limitante en el tratamiento biológico. Por ejemplo, la materia orgánica carbonosa del agua residual es el sustrato que es objeto de conversión en el tratamiento biológico.

**Procesos de Cultivo en Suspensión.** Son los procesos de tratamiento biológico en los que los microorganismos responsables de la conversión de la materia orgánica u otros constituyentes del agua residual en gases y tejido celular, se mantienen en suspensión dentro del líquido.

**Procesos de Cultivo Fijo.** Son los procesos de tratamiento biológico en los que los microorganismos responsables de la conversión de la materia orgánica u otros constituyentes del agua residual en gases y tejido celular, están fijados a un medio inerte tal como piedras, escorias o materiales cerámicos y plásticos, especialmente diseñados. Los procesos de cultivo fijo se conocen también como procesos de película fija.

### **2.2.1 Procesos de Tratamiento.**

Los principales procesos biológicos utilizados en el tratamiento del agua residual se identifican en la tabla 2.2.

Los procesos individuales se subdividen a su vez, dependiendo de si el tratamiento se lleva a cabo en sistemas de cultivo en suspensión, de cultivo fijo o en combinaciones de los mismos.

Las principales aplicaciones de estos procesos son: 1) la eliminación de la materia orgánica carbonosa presente en el agua residual, generalmente medida como DBO, carbono orgánico total (COT), o como demanda química de oxígeno (DQO); 2) nitrificación, 3) desnitrificación y 4) estabilización.

TABLA 2.2 PRINCIPALES PROCESOS BIOLÓGICOS UTILIZADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

TIPO	NOMBRE COMÚN
<b>PROCESOS AEROBIOS:</b> CULTIVO EN SUSPENSIÓN	LODOS ACTIVADOS: - CONVENCIONAL - ALTA TASA - MEZCLA COMPLETA - AEREAACION POR PASOS - AEREAACION PROLONGADA - ESTABILIZACIÓN POR CONTACTO - OXIGENO PURO - ZANJAS DE OXIDACIÓN
CULTIVO FIJO	LAGUNAS AEREADAS DIGESTIÓN AEROBIA
<b>PROCESOS ANAEROBIOS:</b> CULTIVO EN SUSPENSIÓN	FILTRO PERCOLADORES BIODISCOS
CULTIVO FIJO	DIGESTIÓN ANAEROBIA LAGUNAS ANAEROBIAS

### ***Lodos Activados.***

Este proceso depende del uso de una alta concentración de microorganismos presentes como un flóculo que se mantiene suspendido por medio de agitación o con aire comprimido, aunque actualmente se usa el agitado mecánico (figura 2.2). En cualquiera de los dos casos se obtienen altas tasas de transferencia de oxígeno. El efluente de la etapa de aereación es bajo en sustancias orgánicas disueltas pero contiene sólidos suspendidos (SS) altos (2000 a 8000 mg/l), que deben retirarse por sedimentación. Desde el punto de vista de funcionamiento, el residuo orgánico se introduce en un reactor donde se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión. El contenido del reactor se denomina licor mezclado. El ambiente aerobio en el reactor se consigue mediante el uso de difusores o aereadores mecánicos que, a su vez, sirven para mantener el licor mezclado en un régimen de mezcla completa. Tras un periodo determinado de tiempo, la mezcla de las nuevas células con las viejas se conduce a un tanque de sedimentación donde las células se separan del agua residual tratada. Una parte de las células sedimentadas es recirculada para mantener la concentración deseada de organismos en el reactor, mientras que otra es purgada del sistema. El nivel al cual se debe mantener la masa biológica depende de la eficiencia deseada del tratamiento y de otras consideraciones referentes a la cinética del crecimiento. El método ha probado ser útil para el

tratamiento de muchos desechos industriales orgánicos, que alguna vez se pensó eran tóxicos para los sistemas biológicos.

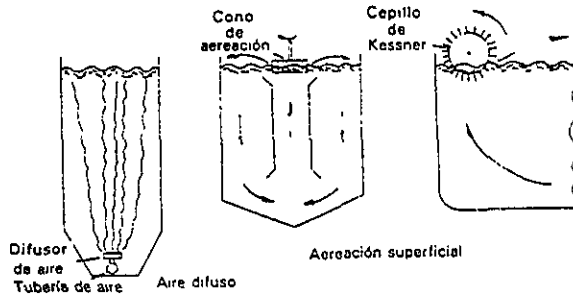


FIGURA 2.2 MÉTODOS DE AEREACIÓN DE LOS LODOS ACTIVADOS.

En el sistema de aire difuso, gran parte del aire se utiliza para provocar agitación en el reactor y sólo una pequeña cantidad se utiliza para las reacciones de oxidación. Cuando no se agita, como en el tanque de sedimentación final, los sólidos se precipitan rápidamente en el fondo y pierden contacto con la materia orgánica en el nivel líquido. Los sólidos sedimentados se convierten rápidamente en anaerobios si no se regresan a la zona de aereación. Se debe transferir suficiente aire al licor mezclado para conservar un oxígeno disuelto (OD) de 1 a 2 mg/l. El licor mezclado debe ser de una concentración y actividad adecuadas para proporcionar adsorción y oxidación rápidas al desecho, así como producir un lodo que se sedimente fácilmente y pueda producir con rapidez un efluente clarificado y el lodo pueda retornarse a la zona de aereación sin tardanza.

En general, un volumen de lodos del 25 al 50% del flujo que pasa por la planta se retira del tanque de sedimentación; entre el 50 y el 90% de este volumen se regresa a la zona de aereación el resto se deshidrata y se desecha junto con otros lodos de la planta. Si el lodo que se regresa es insuficiente, los sólidos suspendidos del licor mezclado (SSLM) serán bajos y la estabilización resultante será pobre. Por el contrario, el regreso de cantidades excesivas de lodos dará como resultado que los SSLM sean muy altos y que no se sedimenten bien, en cuyo caso pueden ejercer demandas de oxígeno más altas que las que se pueden satisfacer. Si los lodos no se quitan rápidamente de los tanques de sedimentación, éstos emergen debido a la producción de nitrógeno por la reducción de nitratos en condiciones anaerobias; cuando esto ocurre, el efluente que se obtiene es muy pobre.

Se han hecho muchas modificaciones al proceso de lodos activados, tanto en la forma de aereación (difusores de burbujas finas y gruesas, sistema inka, aereadores de alta eficiencia con y sin anillos de aspersión) como en el proceso en sí. (figura 2.3)

**LODOS ACTIVADOS DE ALTA TASA.** Con tiempos de retención cortos (2 hr.) y bajos SSLM (cerca de 1000 mg/l), se logra rápidamente la estabilización parcial a bajo costo, con cargas de hasta 16 kg de DBO/m<sup>3</sup>d y con un abastecimiento de aire de 3 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

En tales plantas se logran remociones de DBO del 60 al 70% y son adecuadas para el pretratamiento de desechos fuertes o para efluentes descargados en aguas de estuarios donde se aplican normas de calidad menos rígidas.

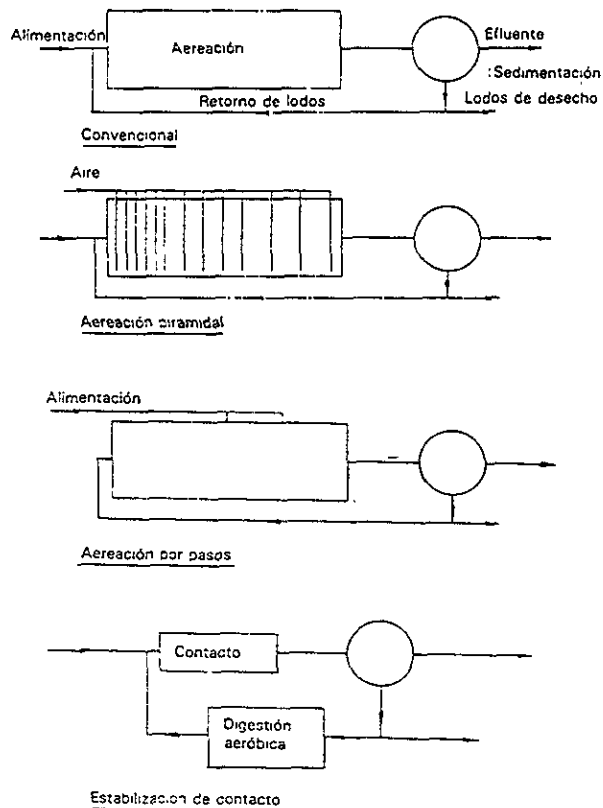


FIGURA 2.2 MODIFICACIONES DEL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS.

**AERACION PIRAMIDAL Y AERACION POR PASOS.** En un sistema convencional de tránsito de flujo, la tasa de oxidación es máxima en el extremo de entrada del tanque y en ocasiones es difícil mantener condiciones aerobias con una distribución uniforme de aire. Con la aereación piramidal, el abastecimiento de aire se reduce progresivamente a lo largo de la longitud del tanque, de modo que aunque se use el mismo volumen total de aire que antes, se concentra más aire en la entrada del tanque para hacer frente a la alta demanda que ahí se presenta. La aereación por pasos busca lograr el mismo objetivo con la adición de la alimentación de desecho a intervalos a lo largo del tanque para dar una demanda de oxígeno más constante en la zona de aereación. De esta manera, no es necesario reaerar el lodo de retorno antes de agregarlo a la zona de aereación, lo cual es algo que con frecuencia es necesario en las plantas convencionales para evitar una situación de cero oxígeno disuelto (OD) en la zona de entrada del tanque de aereación. La unidad completamente mezclada es la extensión natural de este concepto.

**AERACION PROLONGADA.** Con el uso de tiempos prolongados de aereación (24 a 48 hr.) es posible operar en la zona de respiración endógena y que se produzca menos lodo que en una planta normal. Estas plantas son muy adecuadas para pequeñas comunidades donde el volumen de lodos es reducido y la naturaleza relativamente inofensiva del lodo mineralizado son ventajas considerables. Sin embargo, estas ventajas representan costos de operación más altos (debido al mayor tiempo de aereación) y las plantas no producen un efluente con estándar 30:20 debido al acarreo de sólidos de la zona de sedimentación.

**ESTABILIZACIÓN POR CONTACTO.** Este proceso usa la capacidad de adsorción que tienen los lodos para quitar materia orgánica en solución en un tanque pequeño (retención de  $\frac{1}{2}$  a 1 hr.). Después se transfiere el lodo y las sustancias orgánicas adsorbidas en forma de una suspensión concentrada a una unidad de digestión aerobia para la estabilización (retención de 2 hr. a 3 hr.). Los sólidos suspendidos en la zona de contacto son cerca de 2000 mg/l, mientras que en la unidad de digestión puede alcanzar una concentración tan alta como 20,000 mg/l.

**LODOS ACTIVADOS CON OXIGENO PURO.** Un desarrollo reciente ha sido la introducción de plantas de lodos activados que operan con oxígeno puro. Tales instalaciones incluyen la introducción de oxígeno en tanques cerrados de reacción agitados. Estas unidades pueden operar a niveles relativamente altos de SSLM (6,000 a 8,000 mg/l) al tiempo que proveen buenas condiciones de sedimentación de lodos; además son económicas por su bajo consumo de energía y requerimientos mínimos de terreno. La necesidad de recircular el oxígeno no aprovechado por los microorganismos obliga al empleo de tanques cerrados con mínima posibilidad de interconexión con el aire ambiente lo que encarece las inversiones y hace más compleja la operación.



---

**ZANJAS DE OXIDACIÓN.** Es un proceso de lodos activados, comúnmente operan como un proceso de aereación extendida. La unidad consiste de un canal en forma de circuito cerrado, de 0.9 a 1.8 metros de profundidad, con paredes de 45° de pendiente y aereadores mecánicos, localizados en uno o varios puntos a lo ancho de la zanja. El efluente de un pretratamiento, comúnmente cribado, trituración o desarenación, entra a la zanja, es aereado por cepillos horizontales, o aereadores tipo disco diseñados especialmente para zanjas de oxidación y circula a lo largo del canal a una velocidad de aproximadamente 0.3 a 0.6 m/seg. Los aeradores crean una mezcla y provocan la circulación del agua en la zanja, así como una transferencia de oxígeno suficiente. La mezcla en el canal es uniforme, pero pueden existir zonas de baja concentración de oxígeno disuelto. Los aereadores operan en un ámbito de 60 a 110 rpm y proporcionan velocidad suficiente para mantener los sólidos en suspensión. En este proceso puede ocurrir un alto grado de nitrificación, sin ninguna modificación del sistema en especial. La razón de lo anterior se debe a los largos tiempos de retención de los sólidos utilizados (10 a 50 días).

### ***Lagunas aereadas.***

Análogas al proceso de lodos activados con aereación prolongada, estas lagunas utilizan aereadores flotantes para mantener los niveles de OD y hacer el mezclado. Es posible tener cargas de DBO de 0.2 kg/m<sup>2</sup>d, con tiempos de retención de 2 a 7 días, y que se produzca una baja concentración de biomasa en el reactor (SSLM de 150 a 350 mg/l). El proceso incluye el mantenimiento de un flóculo esencialmente bacteriano en lugar del sistema de bacterias y algas de las lagunas más simples.

Las lagunas aereadas pueden ser diseñadas totalmente mezcladas y totalmente aeróbicas o parcialmente mezcladas y facultativas (una parte del volumen se encuentra en condiciones aeróbicas y el resto en condiciones anaeróbicas).

En lagunas completamente mezcladas, para aprovechar mejor la energía suministrada al sistema, es común emplear una unidad de sedimentación del efluente para concentrar y recircular la totalidad de lodos sedimentados al sistema de lagunas, incrementando así la concentración de SSVLM hasta 800 mg/l. En el caso de lagunas facultativas, y dependiendo de las normas de SS en el efluente, se pueden emplear lagunas facultativas o de maduración, no aereadas, para eliminar los sólidos suspendidos y mejorar la calidad del efluente.

### Filtros percoladores.

La forma más antigua de unidad de tratamiento biológico consiste básicamente de un lecho de piedra, circular o rectangular (figura 2.4), con adición intermitente o continua en la superficie de agua residual sedimentada.

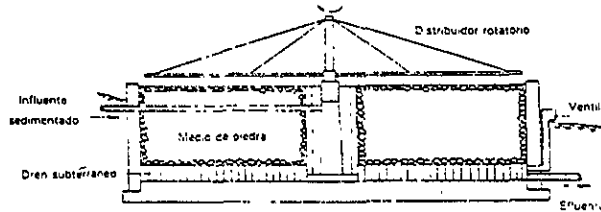


FIGURA 2.4 UN FILTRO PERCOLANTE CONVENCIONAL.

El filtro percolador moderno consiste en un lecho formado por un medio sumamente permeable al que se adhieren los microorganismos y a través del cual se filtra el agua residual. El medio filtrante consiste generalmente en piedras cuyo tamaño oscila de 2.5 a 10 cm de diámetro. La profundidad de piedras varían con cada diseño particular, generalmente de 0.9 a 2.4 m con una profundidad media de 1.8 m. Existen filtros percoladores que utilizan unos medios filtrantes plásticos, que constituyen una innovación más reciente y que se construyen de sección cuadrada u otra cualquiera, con profundidades de 9 a 12 m. El lecho del filtro es generalmente circular y el líquido a tratar se rocía por encima del lecho mediante un distribuidor giratorio.

La materia orgánica presente en el agua residual es degradada, por una población de microorganismos adherida al medio (figura 2.5). Dicha materia orgánica es adsorbida sobre la película biológica, en cuyas capas externas es degradada por los microorganismos aerobios. Cuando los microorganismos crecen, el espesor de la película aumenta y el oxígeno es consumido antes de que pueda penetrar en todo el espesor de la película. Por la tanto, se establece un ambiente anaerobio cerca de la superficie del medio.

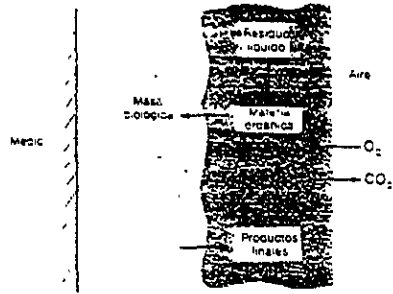


FIGURA 2.5 REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN PELÍCULA BIOLÓGICA EN UN FILTRO PERCOLADOR.

Conforme la película aumenta de espesor, la materia orgánica adsorbida es metabolizada antes de que pueda alcanzar los microorganismos situados cerca de la superficie del medio filtrante. La consecuencia de no disponer de una fuente orgánica externa de carbono celular, es que los microorganismos situados cerca de la superficie del medio filtrante se encuentran en la fase endógena de crecimiento, en la que pierden su capacidad de adherirse a la superficie del medio. En estas condiciones el líquido a su paso a través del medio arrastra la película y comienza el crecimiento de otra nueva. Este fenómeno de la pérdida de la película biológica es fundamentalmente función de la carga hidráulica y orgánica del filtro. La carga hidráulica origina las velocidades de arrastre y la carga orgánica influye en la velocidad del metabolismo en la película biológica. En base a estas cargas hidráulicas y orgánicas, los filtros suelen dividirse en dos clases: de baja y de alta carga.

### ***Biodiscos (discos biológicos).***

El proceso de biodiscos consiste en una serie de discos circulares de poliestireno o cloruro de polivinílico situados sobre un eje, a corta distancia entre ellos. Los discos están parcialmente sumergidos en el agua residual y giran lentamente en el seno de la misma (figura 2.6).

Una vez en funcionamiento, los crecimientos biológicos se adhieren a las superficies de los discos hasta formar una película biológica sobre la superficie mojada de los mismos. La rotación de los discos pone alternativamente en contacto a la biomasa con la materia orgánica presente en el agua residual y con la atmósfera para la adsorción de oxígeno. La rotación del disco induce la transferencia de oxígeno y mantiene a la biomasa en condiciones aerobias. La rotación es así mismo el mecanismo de eliminación del exceso de sólidos en los discos por medio de fuerzas cortantes que crea y para mantener los sólidos

arrastrados en suspensión de tal modo que pueden ser transportados desde el reactor al clarificador. Los biodiscos pueden utilizarse como tratamiento secundario, y pueden también operarse para obtener nitrificación estacional y continua.

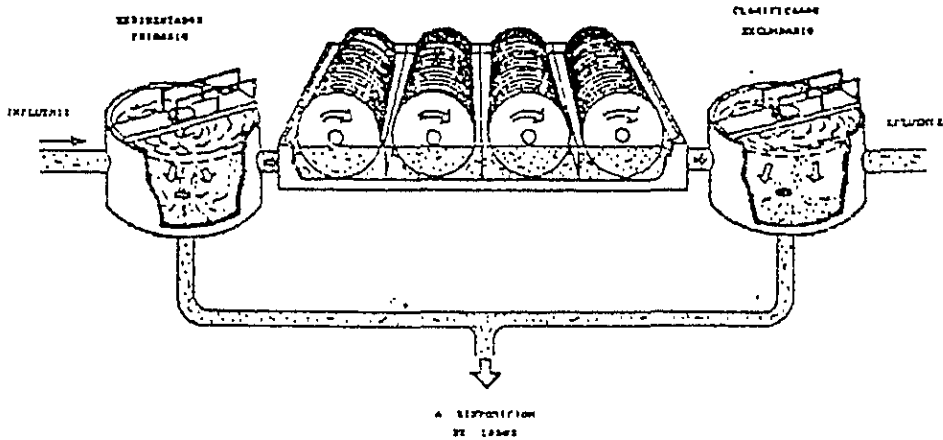


FIGURA 2.6 SISTEMA DE DISCOS BIOLÓGICOS.

La superficie de los discos que está sumergida en las aguas residuales es de aproximadamente un 40% para poder constituir una película biológica fija de 1 a 4 mm de espesor. Los discos están accionados por un motor y gira a una velocidad de 1 a 2 rpm, pero generalmente de 1.4 a 1.6 rpm, teniendo los discos contacto con el agua residual y la atmósfera al mismo tiempo.

### 2.3 PRODUCCIÓN DE LODOS BIOLÓGICOS.

Las cantidades de sólidos producidos en los diferentes procesos de tratamiento se determinan rutinariamente en las plantas de purificación de aguas y de tratamiento de las aguas residuales. Las estimaciones de las cantidades probables se pueden basar en los análisis de las aguas o de las aguas residuales que se van a tratar y en las remociones esperables mediante los procesos específicos de tratamiento. También se deberán tomar en consideración los tratamientos coincidentes y subsecuentes de los sólidos sobre una base en peso. Las estimaciones de los volúmenes asociados dependen del contenido de agua o de sólidos, y de la porción y pesos específicos de los sólidos componentes, tanto volátiles como fijos.

---

### **2.3.1 Sólidos del pretratamiento.**

Es común que un tratamiento preliminar incluya el cribado y la remoción de arena. Durante la etapa de cribado se remueven sólidos de gran volumen tales como plásticos, latas, madera, trapos entre otros, los cuales interfieren en la operación de los equipos mecánicos; por otro lado esta etapa prepara el agua para las etapas siguientes.

Todos los sólidos separados durante esta etapa no se incorporan con los lodos para un tratamiento común, por el contrario, se almacenan separadamente teniendo como destino final los rellenos sanitarios, es recomendable no almacenarlos durante largo tiempo (más de 24 hr.), ya que presentan características putrescibles lo que ocasiona plagas nocivas de insectos y roedores. El tratamiento y manejo de este tipo de sólidos no será discutido en el presente trabajo.

### **2.3.2 Lodos primarios.**

Durante el tratamiento primario de agua residual muchos sólidos suspendidos son separados mediante una operación física denominada, sedimentación por gravedad. La eliminación de estos sólidos por sedimentación se basa en la diferencia de peso específico entre las partículas sólidas y el líquido donde se encuentra, que acaban en el depósito de las materias en suspensión. Existen casos particulares donde la separación de estos materiales se lleva a cabo por flotación. (Ramalho, 1991).

En el tratamiento primario, aproximadamente más de la mitad de los sólidos suspendidos del agua residual son removidos. La demanda bioquímica de oxígeno removida se calcula en una tercera parte, la cual está representada por la misma cantidad de sólidos removibles en este primer tratamiento.

Algunos de los efectos del tratamiento primario en su efluente, es la reducción en la concentración de nutrientes, organismos patógenos, elementos traza y compuestos orgánicos potencialmente tóxicos, también contiene algo de arena que no fue retirada en las cámaras desarenadoras. Todos estos materiales producto del tratamiento primario, es una suspensión concentrada de partículas en agua denominada lodo primario (National Research Council 1996). Los lodos primarios son generalmente de color grisáceo y despiden olores desagradables.

La producción de lodos primarios en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales típicas se encuentra entre 100 y 300 gramos de sólido seco por metro cúbico de agua residual tratada (Cheremisnoff, 1988). Para su estimación más precisa debe determinarse la carga total de sólidos suspendidos

en el influente del sedimentador primario y suponer un 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 un agua residual doméstica contiene en promedio 220 mg/l de SS y la eficiencia de remoción de sólidos sedimentables en el sedimentador primario es de 60% (Metcalf & Eddy, 1991); además si consideramos el caudal de 121 m<sup>3</sup>/s de agua que a corto plazo será tratada en México; la cantidad de los lodos primarios que se estiman produce será de 1379.98 ton/día como sólidos secos. Regularmente los lodos se generan con una concentración de 1%, por consiguiente el volumen a manejar de este tipo de lodo será de 1,597 l/s.

### **2.3.3 Lodos secundarios.**

En el tratamiento secundario o biológico de las aguas residuales, parte de la materia orgánica es oxidada por los microorganismos para producir bióxido de carbono y otros productos finales, y el resto proporciona la energía y materiales necesarios para mantener a la comunidad microbiana. Los microorganismos biológicamente floculan y se aglomeran para formar partículas sedimentables, el exceso de biomasa formada es separada en tanques de sedimentación como una suspensión concentrada llamada lodo secundario o mejor conocido como lodo biológico (National Research Council 1996).

El lodo forma en filtro percolador, es similar al de lodos activados, sin embargo se han desarrollado modelos matemáticos específicos para predecir su producción. Los lodos en biodiscos aún no han sido tan estudiados como los de los sistemas biológicos antes mencionados; sin embargo, se sabe que es similar en concentraciones de sólidos, contenido de nutrientes y otras características al lodo formado en el filtro percolador (EPA, 1979).

En general, los lodos primarios son más concentrados, tiene mayor poder calorífico, mayor contenido de grasas y aceites, aunque sus propiedades nutritivas son más pobres que los lodos secundarios.

### **2.3.4 Lodos químicos.**

Los lodos químicos se generan cuando durante en tratamiento de aguas residuales se aplican productos químicos para remover sólidos suspendidos y fósforo, en la remoción de nitrógeno no se generan cantidades significativas. Entre los más comúnmente empleados se encuentran el hidróxido de calcio, sulfato de aluminio, sales de hierro y algunos polímeros (Culp et al, 1978). Cabe mencionar que el potencial de generación de este tipo de lodos es muy

---

característico de las diferentes industrias que utilizan tratamientos fisicoquímicos para el tratamiento de sus aguas residuales.

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 la aplicación de coagulantes de sales de hierro y aluminio producen flóculos gelatinosos difíciles de deshidratar. Otro factor importante que determina las características de los lodos químicos es la cantidad de materia orgánica 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 (Culp et al, 1978).

La producción de lodos químicos dependen del agente químico y del punto de aplicación; puede estimarse con base a la estequiometría de las reacciones químicas involucradas y a partir de resultados experimentales obtenidos mediante la prueba de jarras (Culp et al, 1978).

## **2.4 CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS 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 físicos, biológicos o por efecto de precipitación química. Los lodos se clasifican de acuerdo a su origen en lodos primarios, secundarios y químicos y de acuerdo con su estado o tratamiento recibido, en lodos crudos o frescos, lodos digeridos, húmedos y secos. Dependiendo de esto, las características y concentraciones de sólidos suspendidos varían, afectando de una u otra forma su tratamiento y manejo.

Los lodos primarios contienen partículas sólidas sedimentables, principalmente de naturaleza orgánica.

Los lodos secundarios o biológicos consisten predominantemente de la biomasa producida en exceso durante los procesos de tratamiento biológicos y de material orgánico parcialmente descompuesto. Sus características y composición dependen fundamentalmente del método de tratamiento biológico empleado (lodos activados, filtro percolador, biodiscos, etc.) y de la velocidad de crecimiento y metabolismo de los microorganismos (Cheremisinoff, 1988). Los lodos generados por sistema de lodos activados presentan concentraciones de sólidos muy bajas, por lo que su espesamiento y deshidratación se dificultan.

Los lodos químicos resultan de procesos de tratamiento con productos químicos, tales como cal, polímeros orgánicos y sales de hierro y aluminio.

Generalmente la cal y los polímeros ayudan al deshidratado y desaguado, mientras que las sales de hierro y aluminio reducen la capacidad de deshidratado y desaguado por la producción de lodos hidratados con agua ligada.

El tratamiento de lodos primarios 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, formando una torta más seca y proporcionan una mejor captura de sólidos. Por esto, siempre que sea posible, es recomendable mezclar los lodos biológicos con los lodos primarios antes de iniciar su tratamiento.

Las características externas como el color, aspectos y olor facilitan el conocimiento del estado del lodo y su procedencia.

Los lodos primarios frescos suelen ser grises y tienen mal olor. Los lodos secundarios tienen generalmente color pardo-amarillento y rara vez huelen mal. El lodo digerido es negro y tiene un olor característico a alquitrán.

La composición de los lodos depende tanto del tipo de agua residual del que provienen como del tratamiento a que ésta ha sido sometida, como se muestra en la tabla 2.3.

TABLA 2.3 ANÁLISIS DE DIVERSOS TIPOS DE LODOS

COMPONENTE	TIPO DE LODO		
	CRUDO	DIGERIDO	ACTIVO
Material volátil	60-80	45-60	62-75
Cenizas	20-40	40-45	25-38
Cenizas insolubles	17-35	35-50	22-30
Grasas	7-35	3-17	5-12
Proteínas	22-28	16-21	32-41
Nitratos de amonio	1-3.5	1-4	4-7
Ácido fosfórico (como P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	1-1.5	0.5-3.7	3-4
Potasa (como K <sub>2</sub> O)		0-4	0.86
Celulosa, etc.	10-13	10-13	7.8
SiO <sub>2</sub>		15-16	8.5
Hierro		5.4	7.1

Fuente: Metcalf & Eddy, 1991.

Estas características se pueden considerar como valores medios para aguas residuales urbanas.

La composición de los lodos varía en función del tipo de instalación para el tratamiento de aguas. Este hecho queda indicado en la tabla 2.4.



Los lodos representan un volumen aproximado al 1% del agua residual tratada, lo que redundará en una cantidad final importante.

**TABLA 2.3 CANTIDAD Y COMPOSICION DEL LODO DE DIFERENTES INSTALACIONES**

INSTALACIÓN	a Contenido de Sólidos en g/hab.día	b Contenido de Sólidos en (%)	c Contenido de agua (%)	d Producción de lodo l/hab.día (a/b * 100/1000)
<b>A. Sedimentador + digestión</b>				
1. Lodo fresco extraído de la tolva de los sedimentadores	54	2.5	97.5	2.16
2. Lodo fresco, desprovisto del agua en exceso al ser bombeado	54	5.0	95	1.08
3. Lodo digerido húmedo	34	13	87	0.26
4. Lodo digerido secado al aire (aireado)	34	45	55	(0.13)
<b>B. Lodos activados + digestión</b>				
	I = de baja carga II = de alta carga			
5. Lodo de los sedimentadores secundarios	I 13 II 20	8 5	92 95	0.16 0.40
6. Lodo fresco mixto (de los sedimentadores primarios y secundarios)	I 67 II 74	5.5 5	94.5 95	1.22 1.48
7. Lodo mixto digerido húmedo	I 43 II 48	10 10	90 90	0.43 0.48
8. Lodo mixto digerido seco (aireado)	I 43 II 48	45 45	55 55	(0.17) (0.19)
<b>C. Tratamiento de lodo con digestores</b>				
9. Lodo en exceso bombeado fresco	I 31 II 25	0.7 1.5	99.3 98.5	2.07 1.25
10. Lodo en exceso, con la misma densidad que tiene al separarse a la ½ hrs en una muestra de agua del tanque de aireación	I 31 II 25	1.5 2.0	98.5 98	1.87 1.75
11. Lodo en exceso fresco mezcla con el de los sedimentadores primarios	I 85 II 79	4.5 4.5	95.5 95.5	1.87 1.75
12. Lodo mixto digerido	I 55 II 52	7 10	93 90	0.79 0.52
13. Lodo mixto digerido (aireado)	I 55 II 52	45 45	55 55	(0.23) (0.22)
Fuente: División de Educación Continua, F.I., 1994				

## 2.5 NORMATIVIDAD.

El propósito de la legislación en materia de contaminación del agua, es conservar las cualidades de las fuentes tanto subterráneas como superficiales, así como la protección de los cuerpos receptores e incrementar las actividades relativas a la conservación de éstos, para velar por la salud pública y garantizar el abasto para nuestras futuras generaciones.

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos de 1917, expresa en su artículo 27, que la propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional corresponde originalmente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares constituyendo la propiedad privada. Las expropiaciones sólo podrán hacerse por causa de utilidad pública y mediante indemnización. La Nación tendrá en todo tiempo el derecho de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público, así como el de regular el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación, para hacer una distribución equitativa de la riqueza pública y para cuidar de su conservación.

Lograr hacer de las disposiciones jurídicas en materia ambiental, instrumentos realmente eficientes y eficaces, que regule de manera clara y adecuada la problemática ambiental que tiene por objeto propiciar el desarrollo sustentable, es el objetivo fundamental de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la cual se emana de la Constitución y es la encargada de expresar las Disposiciones de orden público e interés social que propician el desarrollo sustentable. En esta ley se dictan los términos del aprovechamiento sustentable, la preservación y, en su caso, la restauración del suelo, el agua y los demás recursos naturales, de manera que sean compatibles la obtención de beneficios económicos y las actividades de la sociedad con la preservación de los ecosistemas.

Los títulos de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, son los siguientes: I. Disposiciones generales, II. Biodiversidad, III. Aprovechamiento sustentable de los elementos naturales, IV. Protección al ambiente y V. Participación social e información ambiental. Es en el título IV "Protección al ambiente" capítulo III, donde hace referencia a la prevención y control de la contaminación del agua y de los ecosistemas acuáticos, expresa en los artículos 117 al 119 bis, lo relacionado a la prevención y control de la contaminación del agua considerando varios criterios; así como en los artículos 120 a 128 lo referente a la contaminación del agua especialmente por aguas residuales.

En el mismo sentido que la Ley General, La Ley de Aguas Nacionales es también reglamentada del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en materia de aguas nacionales; y tiene como objetivo regular la

---

explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su calidad y cantidad. Esta Ley es también de observancia general en todo el territorio nacional, y sus disposiciones son de orden público e interés social.

Los títulos de la Ley de Aguas Nacionales son: I. Disposiciones preliminares, II. Administración del agua, III. Programación hidráulica, IV. Derechos de uso o aprovechamiento de aguas nacionales, V. Zonas reglamentadas, de veda o de reserva, VI. Usos del agua, VII. Prevención y control de la contaminación del agua, VIII. Inversión de infraestructura hidráulica, IX. Bienes nacionales a cargo de la Comisión y X. Infraestructura, sanciones y recursos.

De estos títulos el séptimo es el que consolida una sola autoridad en materia de calidad del agua y es denominada como "La Comisión" (Comisión Nacional del Agua), la encargada de cumplir en este sentido.

Uno de los mecanismos básicos para el ejercicio de las atribuciones de la CNA son las declaratorias de clasificación de los cuerpos de agua nacionales. En esas declaratorias la CNA debe determinar los parámetros que habrán de cumplir las descargas; la capacidad de asimilación y dilución de los cuerpos de aguas nacionales y las cargas de contaminantes que éstos pueden recibir, así como las metas de calidad y los plazos para alcanzarlos (artículo 87). Asimismo, se hace énfasis que corresponde a los municipios el control de las descargas de aguas residuales a los sistemas de drenaje o alcantarillado (artículo 88). La "Comisión" (CNA), puede ordenar la suspensión de las actividades que dan origen a las descargas de aguas residuales, por lo tanto es ésta la que debe emitir las normas relativas a la protección de la calidad del agua. En la actualidad se realiza una tarea de simplificación de tal manera que la meta sea reducir aproximadamente 60 Normas a solo 3, con el fin de lograr un cumplimiento accesible y consiente de los usuarios que aportan de aguas residuales. A la fecha se cuenta con una Norma Oficial y dos Proyectos de Norma.

Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1997, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 1997 (aclaración publicada en el D.O.F. el 30 de abril de 1997), ésta norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes Nacionales.

Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 9 enero 1997, y que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado, y

Proyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 14 de enero 1998, y que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusan en servicios públicos.

Por otra parte y en el mismo sentido se publicó en el Diario Oficial del día 12 de enero de 1994, el reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, en donde hace referencia en su artículo 148 al subproducto del tratamiento biológico de las aguas residuales, considerando a este como un lodo residual el cual debe ser tratado. Artículo 148. Los lodos producidos del tratamiento de aguas residuales deberán estabilizarse en los términos de las disposiciones legales y reglamentaria de la materia.

El 22 de octubre de 1993, se publica en el D.O.F. la NORMA oficial mexicana NOM-CRP-001-ECOL/93, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente, considerándose como un residuo peligroso aquel que contempla al menos una de las características definidas en el código CRETIB; definiéndose éste como el código de clasificación de las características que contienen los residuos peligrosos y que significan: corrosivo, reactivo, explosivo, tóxico, inflamable y biológico infeccioso.

En la Norma, se describe la clasificación de residuos peligrosos por giro industrial y proceso, denominando al giro como proceso industrial como "producción general" y al residuo peligroso como "lodos del tratamiento de aguas", cuyas características son: tóxicos, reactivos, explosivos y biológico infecciosos.

El Código Sanitario de los Estados Unidos Mexicanos del año de 1995 contempla el problema de la contaminación de las aguas e indica acciones para proteger la salud de los habitantes de nuestro país. La Secretaría de Salud y Asistencia logró en 1972 que se promulgara la Ley Federal para prevenir y controlar la contaminación, basado en esta Ley, se expidió el Reglamento para prevenir y controlar la contaminación de las aguas, que sigue vigente con algunas modificaciones, como parte de la actual Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección del Ambiente, que junto con la Ley de Aguas Nacionales son las que en la actualidad rigen la política ambiental.

### **2.5.1 NORMATIVIDAD EN MATERIA DE LODOS BIOLÓGICOS.**

Varios factores han contribuido al escaso desarrollo de sistemas integrales para el tratamiento y disposición de lodos. Entre ellos se encuentra la falta de una normatividad adecuada para su carga y disposición al ambiente, así como para la

---

evaluación de métodos adecuados de tratamiento que garanticen el mínimo riesgo al ambiente y que sean económicamente atractivos. Por otro lado la escasa experiencia en el país al respecto, y los pocos recursos económicos destinados al tratamiento del agua residual han limitado seriamente el tratamiento integral agua-lodos.

Con respecto a la reglamentación, en México es escasa y no específica respecto al tratamiento y características que deben reunir los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales para su aprovechamiento o en todo caso para su disposición al medio.

Es claro que, La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) en su Capítulo I artículos 1o, 5o y 6o, establece las disposiciones para la preservación y restauración del equilibrio ecológico, formulación de políticas ambientales, así como la regulación de obras y servicios que de algún modo u otro provocan un impacto adverso al ambiente. En el Capítulo III, artículos 134o y 136o, de la LGEEPA establece criterios para prevención y control de la contaminación del suelo. Reforzando, la LGEEPA establece que para prevenir y controlar la contaminación del agua es necesario que las aguas residuales de origen urbano reciban tratamiento previo a su descarga a cuerpos receptores naturales a fin de eliminar los contaminantes presentes en ellas. Esto implica que los lodos de las plantas de tratamiento producidos durante dicho tratamiento contienen gran cantidad de material contaminante que representa una fuente importante de contaminación al ambiente, por tanto requiere de tratamiento.

Por otro lado, en la LGEEPA se prevé la necesidad de regular las actividades relacionadas con residuos peligrosos y deja claro que es el gobierno federal al que le corresponde por conducto de la SEMARNAP, evaluar el impacto al ambiente ocasionado por las instalaciones de tratamiento, confinamiento y eliminación de residuos peligrosos (Diario Oficial 1988 a). Además la LGEEPA define a un residuo peligroso como todo aquel residuo en cualquier estado físico que por sus características corrosivas, tóxicas, venenosas, reactivas, inflamables, explosivas, biológicas infecciosas o irritantes representen un peligro para el equilibrio ecológico (Diario Oficial 1988 b). Dentro de las atribuciones que se le confieren a la secretaría es la de determinar y publicar el listado de aquellos materiales que se consideren peligrosos; así como las normas técnicas para su manejo.

En respuesta a lo anterior, la Secretaría expidió un reglamento en materia de residuos peligrosos (Diario Oficial 1988 c) y más tarde siete Normas Oficiales Mexicanas respecto a la contaminación ambiental para residuos peligrosos, (Diario Oficial 1993 d). En la primera de estas normas (NOM CRT -001/1993 actualmente NOM 052 ECOL/1993) Anexo 3, Tabla 2, Clasificación de Residuos por Fuente no Específica, se encuentra un listado de residuos peligrosos en el

cual se menciona por primera vez a los " lodos de desecho del tratamiento biológico de aguas residuales que contengan cualquier sustancia tóxica al ambiente en concentraciones mayores a los límites señalados en la presente norma".

Por su parte, el reglamento en materia de residuos peligrosos establece entre otras cosas, que corresponden al generador de residuos determinar si éstos son peligrosos o no, en caso afirmativo, en cuyo caso deberán manejarlos y tratarlos si es necesario, de acuerdo a normas que para el efecto se expidan (Diario Oficial 1988 e).

En resumen, en base a la legislación actual, los lodos provenientes de la oxidación biológica del agua residual se pueden considerar potencialmente un residuo peligroso. Sin embargo, cabe hacer la observación que la reglamentación al respecto es limitada y no muy clara, ya que no hace referencia específica a la gestión de lodos de plantas de tratamiento de agua residual municipal, aunque es evidente el riesgo de los lodos cuando la concentración en metales pesados y otros compuestos tóxicos es alta, así como por la gran variedad de organismos patógenos que puedan tener.

En Estados Unidos de América (EUA), la EPA establece en el "Code of Federal Regulations" (CFR) apartado 257 y 503 los límites numéricos permisibles de contaminantes en el lodo, así como los métodos de tratamiento para su manejo y aprovechamiento : 1) Aplicación en terrenos agrícolas como los no agrícolas; 2) Distribución y comercialización; 3) Disposición en el suelo y 4) incineración. Las mayores restricciones respecto a la concentración de contaminantes se refiere a los metales pesados y compuesto orgánicos tóxicos tales como bifelinospoliclorados y pesticidas que no son degradados por tratamientos biológicos.

## **2.6 GENERALIDADES DEL MANEJO Y DISPOSICIÓN DE LODOS BIOLÓGICOS.**

Debido a sus características y composición, los lodos residuales tal como salen de los procesos, no pueden ser depositados directamente al ambiente, ya que ocasionarían problemas de contaminación en el lugar, debido a las altas concentraciones de los contaminantes químicos (mayor que en las aguas residuales originales), y a la materia orgánica separada por los procesos biológicos que no se encuentran totalmente degradada en compuestos estables, produciendo olores desagradables. Además, la consistencia de los lodos hace que sean problemáticos para su transportación y disposición final. Por tal razón, es necesario el tratamiento de los lodos residuales para la estabilización de la materia orgánica y eliminar la mayor cantidad de agua posible para poderlos

---

transportar y depositar, en condiciones adecuadas para no contaminar el medio ambiente.

En general los procesos empleados en el tratamiento de los lodos residuales son los siguientes:

- Concentración.
- Digestión.
- Acondicionamiento.
- Deshidratación y secado.
- Incineración.
- Disposición de lodos y cenizas.

La digestión y la incineración son utilizados principalmente para degradar la materia orgánica los procesos de concentración, deshidratación y secado son utilizados principalmente para remover el agua de los lodos.

En la práctica, la elección del tipo de tratamiento que se debe aplicar al lodo problema, depende de sus características naturales, estructura, composición y su comportamiento ante la deshidratación.

## **2.7 INVESTIGACIONES, ESTUDIOS REALIZADOS EN MATERIA DE TRATAMIENTO Y DISPOSICIÓN DE LODOS BIOLÓGICOS (IMTA, CNA, INST. DE INGENIERÍA, ETC).**

Se citan a continuación algunos de los estudios o investigaciones realizados, en materia de manejo y disposición de lodos biológicos.

Cruz, Teran y Moeller, 1997, presentaron los resultados de la operación de un reactor anaerobio de 420 l de volumen útil, el cual utilizó lodo residual procedente de una fosa séptica, donde el lodo se encontraba severamente contaminado tanto químicamente como biológicamente. El reactor se operó en dos fases con y sin mezclado y con adición de estimulantes de crecimiento. La digestión anaerobia en dos etapas es una expansión de la tecnología de digestión de alta tasa (40 l/s). La cual consiste de dos tanques cerrados, donde en una se lleva a cabo la fermentación y en el otro la separación de fases. Una buena separación de fases indicó óptima operación del digestor. (Aasheim, et al. , 1993). Durante el trabajo indican los autores que se alcanzó una buena degradación de lodo crudo, obteniéndose una fase líquida con moderada contaminación biológica

y sin toxicidad, y una fase sobrenadante o lodo flotante (15 l) con una elevada contaminación biológica y toxicidad. Con base en la DQO total, sólidos totales (ST) y sólidos suspendidos volátiles (SSV), se alcanzó una eficiencia global del proceso de 96.87, 95.19 y 96.89 % respectivamente. Estos resultados, muestran que la digestión anaerobia en dos etapas con adición de estimulantes de crecimiento, resultó ser una alternativa adecuada para tratar lodos residuales de fosa séptica con apreciable concentración de contaminantes tóxicos. Concluyendo que la digestión anaerobia es la forma más común de estabilizar lodos residuales, ya que presenta ventajas significativas sobre otros procesos, como son la producción de lodos que en el procesos anaerobio el volumen producido es más bajo que el que se obtiene de la digestión aerobia, además de requerir menos nutrientes y no utilizar oxígeno.

Flores, Santana y Martín, 1997, realizaron un acondicionamiento químico de lodos de sales de aluminio subproducto de la potabilización del agua, el estudio forma parte de uno más extenso que comprende la investigación sobre recuperación de reactivos y disposición final de lodos provenientes de la potabilización del agua al utilizar sales de aluminio como coagulante primario. El estudio fue realizado en dos etapas, en la primera de ellas se seleccionaron 3 polímeros a partir de 15 de uso generalizado en el tratamiento del agua y lodos. En la segunda etapa se procedió a evaluar el efecto de las variables del proceso sobre las características de deshidratación del lodo.

Maya, Campos y Jiménez C., 1997, presentaron un estudio sobre la eliminación de huevos de helminto por posestabilización alcalina de lodos obtenidos por tratamiento primario avanzado. Cuantificaron y eliminaron con CaO los huevos de helmintos que contenía el lodo de purga de una planta piloto de tratamiento primario avanzado, ubicada en la salida del drenaje profundo de la Ciudad de México. La posestabilización se realizó a diferentes dosis de CaO (20, 30, 40, y 50% (P/P)) en dos experimentos. El primero con 72 % de humedad y el segundo con 79 % de humedad en la pasta de lodos. Los lodos de purga contenían en promedio 150 HH/g. Se determinó una mayor cantidad de HH en la pasta del 79 %. Los autores mencionan haber observado que la eliminación fue directamente proporcional con la dosis de CaO. La mejor eliminación fue en promedio del 93.5 % que corresponde a la dosis del 50 % (P/P) y la menor en promedio fue del 64.7 % con la dosis del 20 % (P/P). Concluyendo que el pH resultó tener una relación directamente proporcional con la eliminación de HH.

Martínez y López, 1997, realizaron la evaluación de la digestión aerobia para la estabilización de los lodos de exceso de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria, donde los autores se refieren a un estudio de tratabilidad a nivel laboratorio de la estabilización vía aerobia de los lodos de



---

exceso de la PTAR-CU. Durante el estudio de tratabilidad se realizaron pruebas a diferentes temperaturas y concentración inicial de sólidos totales, con el fin de obtener los parámetros cinéticos de degradación y otros parámetros básicos de diseño. Como resultado de este estudio se analizó el efecto que tienen los factores T, pH, (ST) en la estabilidad de los lodos. Finalmente los autores propusieron el diseño de dos digestores tipo batch en paralelo, con tiempos de retención hidráulica de 6 días y volumen de 123.4 m<sup>3</sup> cada uno.

Martínez y López, 1997, presentaron el estudio de espesamiento de lodos biológicos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales "Cerro de la Estrella", mediante el proceso de flotación con aire disuelto, analizaron algunos factores que influyen en la prueba batch de flotación a partir de ensayos de un modelo experimental de laboratorio montado específicamente para este fin. Los autores mencionan finalmente que apartir de los resultados obtendrán criterios de diseño de un tanque de flotación para recomendar opciones que integren un tren de lodos de acuerdo con las necesidades de la planta.

Campos, Jiménez P., Rodríguez, Arrebola y Jiménez C., 1997, realizaron un estudio acerca de la producción de biosólidos a partir de los lodos de una planta de tratamiento primario avanzado. Los autores mencionan que el objetivo fue producir biosólidos mediante una posestabilización alcalina. El tratamiento consistió en un desaguado con filtro prensa y una estabilización con cal a diferentes dosis (20, 30, 40 y 50 % (P/P)). En la caracterización observaron que los lodos de purga contenían 53 g de ST/L con un 58.3 % de SV. Mencionando finalmente que a partir del análisis químico (metales pesados, nitrógeno y fósforo) determinaron que estos lodos pueden ser materia prima para producir biosólidos para reuso agrícola.

## CAPITULO 3

### ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO, MANEJO Y DISPOSICIÓN DE LODOS RESIDUALES.

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 el contenido de materia orgánica, 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 3.1 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 mencionados ni los sigue en ese orden, incluso pueden sobreponerse unos con otros.

#### 3.1 CONCENTRACIÓN

El primer paso del tratamiento de lodos debe ser su concentración al máximo para disminuir el volumen de los mismos. La relación aproximada entre el volumen y el peso viene dada por:

$$\frac{V1 - P2}{V2 - P1} \quad (3.1)$$

Donde:

V1 volumen del lodo antes de concentrarse

V2 volumen del lodo después de concentrado

P1 porcentaje en peso del lodo antes de concentrarse

P2 porcentaje en peso del lodo después de concentrado

El espesado de lodos es empleado al inicio de cualquier operación como proceso subsecuente de secado para reducir la carga volumétrica a las unidades de deshidratado e incrementar su eficiencia.

Los equipos de espesado más usados son por gravedad y flotación. Otro tipo de espesadores son los centrífugos cuyo empleo se ha generalizado para varios tipos de lodo, incluyendo lodo primario, secundario y químico, producidos por sistemas de tratamiento terciario.

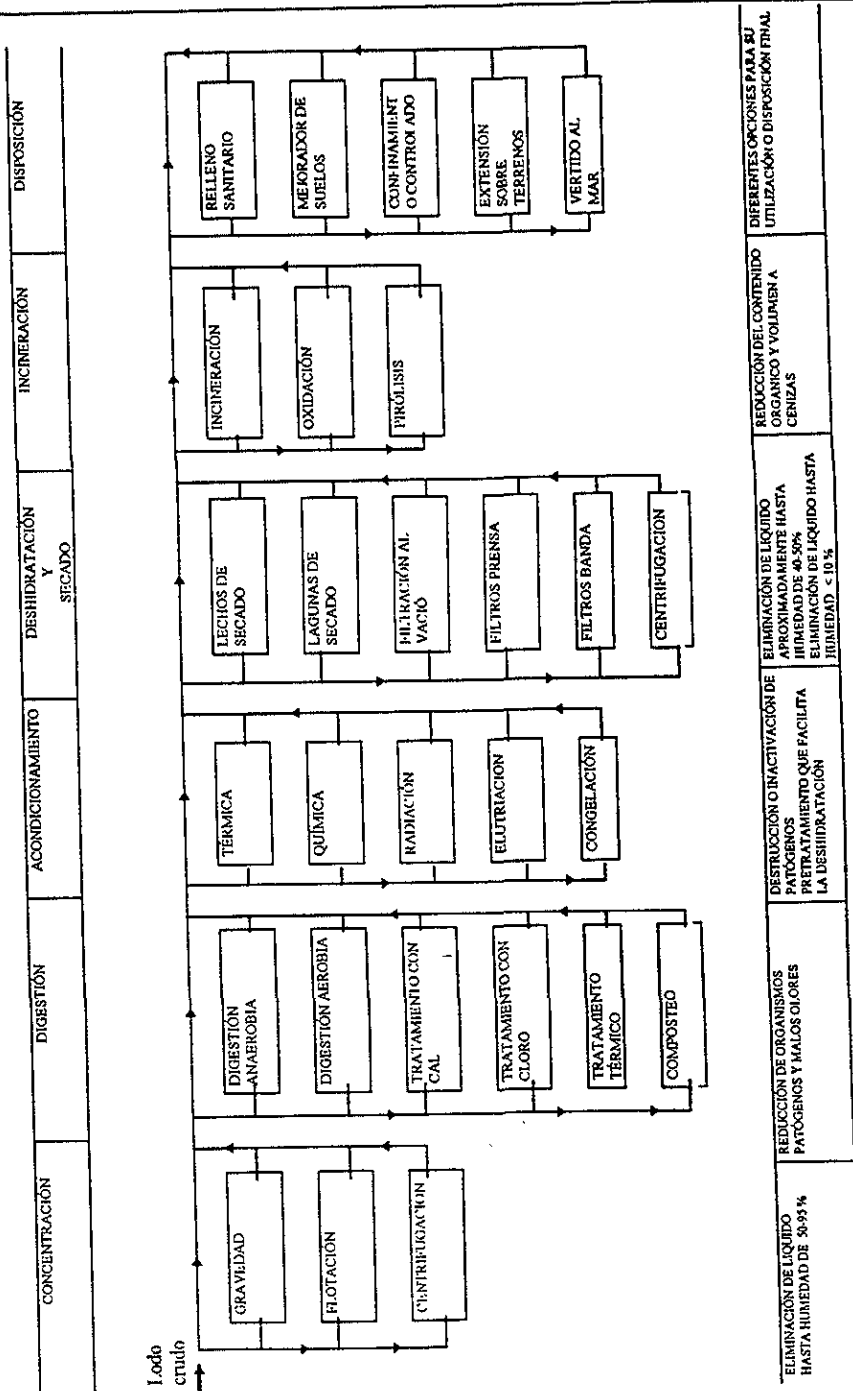


FIG. 3.1 CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS PARA TRATAMIENTO DE LODOS Y ALTERNATIVAS PARA SU DISPOSICIÓN FINAL.

### 3.1.1 Espesamiento por gravedad

Los espesadores por gravedad se desarrollaron en 1950 y se emplean principalmente para espesar lodos primarios, lodos con cal, combinación de lodo primario y el proveniente de lodos activados, y en menor grado, sólo para lodos activados.

La carga hidráulica en estos sistemas varía de 16 a 33  $\text{m}^3/\text{m}^2 \times \text{día}$ , mientras que las cargas orgánicas varían de 90 a 10  $\text{kg} / \text{m}^2 \times \text{día}$  para lodos primarios y de 20 a 30  $\text{kg}/\text{m}^2 \times \text{día}$ .

Los espesadores por gravedad pueden ser estáticos o mecanizados. Los primeros sólo constan del tanque en sí, contando con un cono de descarga con gran pendiente. Solamente se construyen de diámetro pequeño comprendido entre 5 y 8 m como máximo.

Los espesadores mecanizados constan de un conjunto de rastras giratorias, que operan constantemente a poca velocidad con lo que se facilita el desprendimiento de los lodos, así como la colección de los mismos del fondo del tanque.

En la figura 3.2 se presenta la selección de un espesador. Estos sistemas trabajan con una concentración del 2 al 3 % para lodos mixtos de primario y secundario, pudiendo llegar hasta un 4-6 %.

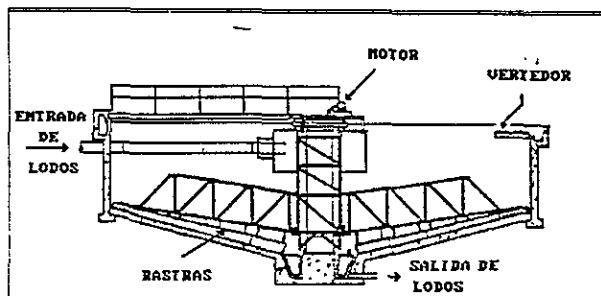


FIGURA 3.2 ESPESADOR CILÍNDRICO DE LODOS (SEDIMENTADOR).

### 3.1.2 Espesamiento por flotación

El espesado por flotación es más eficiente si los lodos son ligeros, es decir, provienen de procesos como lodos activados o filtros percoladores. Los lodos pesados como los obtenidos de sedimentadores primarios y combinaciones de primarios y secundarios (donde la fracción de primarios es mayor) deben manejarse más eficientemente por gravedad. La flotación es un sistema de espesado mediante presurización, esta técnica similar a la utilizada en la recuperación de fibras como la celulosa.

Existen cuatro variantes para la flotación: con aire disuelto, al vacío, por dispersión de aire y electroflotación. De éstas la más empleada es la flotación con aire disuelto, donde el flujo de alimentación es mezclado previamente con un flujo de recirculación antes de entrar al compartimiento de flotación principal, no todas las unidades tienen recirculación. La recirculación puede ser mayor al 100 % que el influente y es presurizado a más de  $5.6 \text{ kg/cm}^2$ . El aire es adicionado al circuito de presurización y disuelto en el flujo de recirculación. Como el flujo entra al tanque de flotación por el fondo, la presión es liberada y se forman pequeñas burbujas, las cuales atrapan las partículas de lodo y las arrastran hasta la superficie del reactor donde son extraídas.

Este proceso no es muy usual en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales por tener un costo elevado y un mantenimiento complejo. Además, éste proceso requiere la adición de sustancias floculantes, como pueden ser polielectrolitos, para mejorar la capa flotante que generalmente tiene de 20 a 40 cm de espesor.

En la figura 3.3 se indica un diagrama de este proceso que puede llevarse a cabo con recirculación del agua clarificada en un porcentaje del 25-50 % del caudal de entrada.

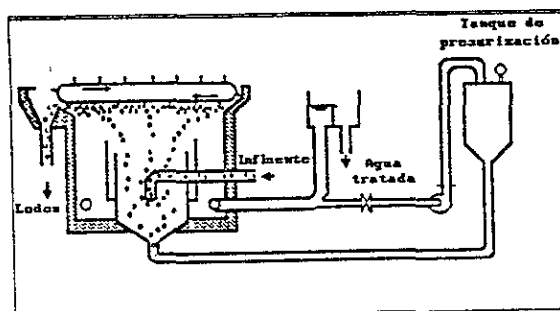


FIGURA 3.3 SISTEMA DE FLOTACIÓN PARA LA SEPARACIÓN DE LODOS.

---

## 3.2 DIGESTIÓN

La estabilización de los lodos es aquel proceso o serie de procesos que generan un lodo con características tales que su disposición final no deteriore el ambiente, no representa riesgos para la salud, ni cause cualquier tipo de desequilibrio ecológico. Algunos de ellos son: digestión anaerobia, digestión aerobia, composteo, tratamiento con cal y tratamiento térmico. Para conseguirlo es indispensable reducir la actividad biológica o el contenido de organismos patógenos, eliminar sustancias tóxicas, olores desagradables, etc..

### 3.2.1 *Digestión anaerobia*

Los lodos producidos en una planta de tratamiento de aguas residuales, además de tener malos olores, tienen gran tendencia a la putrefacción. El fin de la digestión es la descomposición de la materia orgánica putrescible hasta obtener productos estables e inertes, originándose durante este proceso gran desprendimiento de gas.

La digestión anaerobia de lodos se realiza en ausencia de oxígeno, por microorganismos anaerobios, usándose para este proceso recipientes cerrados exclusivos para tal fin.

La digestión tiene lugar en dos fases principales. En la primera, la débil acidez del lodo (con pH ligeramente inferior a 7), baja hasta la correspondiente a un pH de 5.5. En esta fase los microorganismos atacan las sustancias disueltas en el lodo, forman ácidos orgánicos, anhídridos carbónicos y ácido sulfídrico. Esta primera fase se conoce como digestión ácida. La digestión ácida debe ir inmediatamente seguida de la alcalina que constituye la segunda fase. En ésta el pH sube hasta 7.4, transformándose los productos de la primera fase de la digestión en los gases carbónico, nitrógeno y metano. Debido a todo ello, esta segunda fase se conoce como alcalina o metánica.

La fermentación alcalina destruye casi todos los componentes de los lodos como son las hierbas, semillas, gusanos y cierto tipo de bacterias; sin embargo, no se destruyen las transmisoras de la tuberculosis, entre otras.

Otra característica de la digestión es la reducción del volumen de lodos ya que el contenido en agua pasa del 95 al 87%, colaborando en dicha reducción los materiales orgánicos de los mismos degradados a gases.

La temperatura es un factor esencial en el proceso de digestión anaerobia, por lo cual, en principio los digestores debieran trabajar al más alto grado térmico posible. No obstante, no debe olvidarse el elevado costo de las instalaciones que operen en estas condiciones, así como el hecho de que las bacterias mesofílicas sólo trabajan bien en el intervalo de temperaturas 27 a 38° C siendo las

termofílicas las de mayor importancia al trabajar en un intervalo superior de 38-60°C. Además, el aumento de gas con la temperatura es muy lento a partir de los 25°C. Se ha comprobado para el agua residual que el mejor rendimiento se obtiene con una temperatura que oscile alrededor de 35°C, siendo necesario mantener durante la digestión un intervalo máximo de  $\pm 2^\circ\text{C}$ .

En los digestores de dos etapas, el primer tanque se utiliza exclusivamente para la digestión y va dotado de calentamiento de lodos y equipo mecánico para el mezclado completo de los mismos. La decantación se realiza en el segundo tanque.

Los digestores de cubierta o campana flotante son de construcción difícil debido a que a través de aquella no deben existir fugas. Además de los digestores empleados para el tratamiento de las descargas de aguas residuales municipales, existen los digestores de alta carga cuya diferencia fundamental con los de etapa única radica en una mayor carga de sólidos.

En este tipo de digestores, los lodos se mezclan íntimamente mediante algún procedimiento mecánico o simplemente por el propio gas producido. Posteriormente, se drenan las espumas y sobrenadantes para que no entorpezcan la digestión. El lodo de alimentación se calienta siempre para conseguir una digestión óptima y la alimentación es por bombeo en continuo.

Los lodos purgados en este digestor pueden ir a un tanque de alimentación para un posterior secado o a un segundo digestor para separar, por decantación, el sobrenadante y el gas residual. Cuando se elimina el sobrenadante y los sólidos totales se reducen un 45-50% en forma de gas desprendido, el lodo digerido tiene una concentración aproximadamente igual a la mitad de lodos primario.

Teóricamente, el diseño de la digestión anaerobia se basa en la bioquímica y microbiología de los procesos anaerobios.

El concepto de factor de carga es otro de los que facilitan la determinación del volumen de los digestores. Aunque se han propuesto muchos factores, los más convenientes son los basados en la cantidad (kg) de sólidos volátiles añadidos por día y por  $\text{m}^3$  de capacidad del digestor o bien el que se basa en los kilogramos de sólidos volátiles en el digestor.

Otros puntos que deben ser considerados en la aplicación de estos factores son el tiempo de residencia y el tipo de digestor utilizado. La concentración del lodo de entrada varía el tiempo de residencia hidráulica, por lo que es muy importante conocer ambos parámetros para poder calcular el factor de carga.

En la tabla 3.1 se indican los efectos de la concentración del lodo y del tiempo de residencia hidráulica en el factor de carga de sólidos volátiles y en la tabla 3.2 se observa la proporción de sólidos en los diferentes tipos de lodos.

**TABLA 3.1 EFECTOS DE LA CONCENTRACIÓN DEL LODO Y DEL TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRAULICO EN EL FACTOR DE CARGA SÓLIDOS VOLÁTILES (kg./m<sup>3</sup> x día)**

CONCENTRACIÓN DEL LODO (%)	PERIODO DE RETENCIÓN (días)			
	10	12	15	20
4	3.056	2.544	2.032	1.536
5	3.808	3.168	2.396	1.904
6	4.432	3.808	3.056	2.288
7	5.328	4.448	3.552	2.672
8	6.096	5.088	4.064	3.056
9	6.848	5.712	4.576	3.424
10	7.616	6.336	5.088	3.808

Datos basados en que los sólidos volátiles sean el 75% de los totales y la densidad del lodo 1.28 g/cm<sup>3</sup>

**TABLA 3.2 PROPORCIÓN DE SÓLIDOS EN DIFERENTES TIPOS DE LODOS**

Análisis del lodo biológico		
Lodo	% Sólidos volátiles	% Sólidos fijos
Crudo o primario	70	30
Digerido	50	50

El gas producido durante la digestión está compuesto en su mayoría por metano (56 al 70 % en volumen), y también por anhídrido carbónico (25 a 30 % en volumen). Además contiene pequeñas cantidades de nitrógeno, hidrógeno, ácido sulfhídrico y oxígeno. La densidad específica del gas de 0.86 con respecto al valor estándar del aire. La producción de éste varía ampliamente depende del contenido de los sólidos volátiles contenidos en el lodo y de la actividad biológica del reactor.

Respecto a los lodos de entrada es necesario conocer, en primer lugar, su concentración y caudal. Posteriormente, la frecuencia de entrada al digester y por lo menos los siguientes parámetros:

- Sólidos en suspensión
- Sólidos volátiles
- Sólidos totales



- pH
- Alcalinidad
- Temperatura

Durante la digestión de los lodos se necesita saber:

- % de sólidos volátiles
- Ácidos volátiles
- Alcalinidad
- pH
- Temperatura
- Sobrenadante purgado
- Lodo purgado del digestor
- Gas formado

De los lodos purgados del digestor, además del volumen, es interesante saber los sólidos totales y volátiles, así como pH que suele ser neutro.

Del sobrenadante purgado es interesante conocer su contenido en DBO y en sólidos en suspensión, ya que, como normalmente se mandan a la entrada de la instalación, éstos pueden afectar al tratamiento del agua.

El gas formado y su composición indican claramente el estado de la digestión.

El pH cambia durante la digestión. Anteriormente se indicó que, al principio, es ácido para pasar luego a alcalino, debiendo oscilar entre 6.8 y 7.2 para que el proceso sea correcto.

Los materiales volátiles son, igualmente, buenas indicadoras del progreso de la digestión. La alcalinidad es otro parámetro para determinar el progreso de la digestión. El valor normal en una buena digestión debe estar por debajo de los 1,800 mg/l. Esta prueba permite detectar cambios muy sensibles, incluso de los detectados por variaciones en el pH.

La relación entre ácidos volátiles y alcalinidad debe ser siempre inferior a la unidad para la buena marcha de la digestión. Un aumento de esta relación indicará que el proceso comienza a ir mal y un valor de 0.5 de la misma marca el

---

comienzo de problemas en el digestor. Cuando dicha relación llega a 0.8 el pH comienza a variar.

El análisis del gas producido es también una ayuda para el control del proceso de digestión. El gas, que está compuesto normalmente por un 70% de metano y un 30% de anhídrido carbónico, varía de composición si la digestión no funciona correctamente. Así, si la relación anterior de ácidos volátiles/alcalinidad se incrementa, aumenta también el contenido de anhídrido carbónico, el digestor no funciona como es debido. También un corte en la producción de gas indica claramente anomalía en la digestión.

El porcentaje de materias volátiles eliminadas en los lodos también es un parámetro sencillo para el control de la digestión.

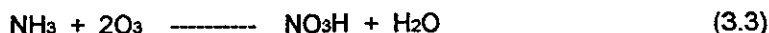
El sobrenadante debe ser purgado y controlado muy estrictamente, pues además de poder perjudicar la digestión, también puede ocasionar problemas en el proceso de depuración del agua ya que su alto contenido en DBO (que puede llegar a las 1,500 ppm) así como en sólidos, hará que la carga de entrada a la planta de tratamiento sea superior a la normal si aquella no se introduce poco a poco.

### **3.2.2 Digestión aerobia**

La digestión aerobia es otra alternativa del tratamiento de lodos. También es conocida como estabilización de lodos. Su fundamento es una aireación prolongada para reducir las materias volátiles de los sólidos hasta lograr un lodo prácticamente inerte. Se puede reflejar el proceso de digestión aerobia mediante la ecuación:



de donde el amoníaco es oxidado a nitratos de acuerdo con la siguiente ecuación:



Este proceso, aunque se puede aplicar a los lodos primarios, es mejor con lodos secundarios; es decir, biológicos o mezcla de primarios y secundarios.

Las diferencias fundamentales entre la digestión aerobia y la anaerobia son las siguientes:

- El sobrenadante tiene menor DBO en la digestión aerobia que en la anaerobia.

- Es mucho más fácil mantener en operación una digestión aerobia que una anaerobia.
- El costo de inversión de la digestión aerobia es menor que el de la anaerobia, ya que en ocasiones puede requerirse el calentamiento del lodo.
- El costo de mantenimiento de la digestión anaerobia es menor que el de la aerobia.

Comparando entre ambos tipos de digestión, no se puede decir a *priori* cuál de ellas es mejor en su totalidad. En cada caso será interesante hacer un balance, por lo que desechar inicialmente la digestión aerobia no es correcto.

Los parámetros que se toman en cuenta para diseñar el proceso son:

- Periodo de retención
- Carga de lodos
- Oxígeno requerido

El periodo de retención, experimentalmente, se ha definido entre 10 a 15 días que es el tiempo necesario para reducir el 40% de los sólidos volátiles que hay en el lodo a una temperatura media de 20°C.

En función de la temperatura, la reducción de los sólidos volátiles puede aumentar hasta un 60%.

La digestión aerobia puede hacerse, al igual que la anaerobia, en una sola etapa o en varias. Normalmente, los digestores funcionan en serie por aireación prolongada y en la modalidad de respiración endógena.

La concentración del lodo de entrada no suele ser muy alta, variando normalmente entre 0.5 y 2.4 %.

### 3.3 ACONDICIONAMIENTO

Generalmente, para deshidratar el lodo proveniente de digestores por diferentes métodos a los de los lechos de secado y, aun en estos casos, algunas veces es necesario acondicionarlos para hacer más eficientes los procesos de secado.

#### a) *Acondicionamiento químico.*

Los reactivos químicos para el acondicionamiento de los lodos suelen ser:

- Ácido sulfúrico
- Sulfato de aluminio
- Sulfato ferroso y férrico
- Cloruro férrico
- Cal
- Polielectrolitos

El cloruro férrico es el más usado para todos los tipos de lodos. Normalmente, se adiciona conjuntamente con cal en una proporción de 1.5 a 2.5 veces superior. Se puede emplear con o sin previa elutriación.

En la tabla 3.2 se muestra la concentración de reactivos que se emplea para el acondicionamiento de lodos en función de su origen.

**TABLA 3.2 DOSIFICACIÓN DE REACTIVOS PARA VARIOS TIPOS DE LODOS**  
(Datos en % de lodo seco)

TIPOS DE LODO	FRESCO		DIGERIDO		ELUTRIADO DIGERIDO
	FeCl <sub>3</sub>	CaO	FeCl <sub>3</sub>	CaO	FeCl <sub>3</sub>
primario	1-2	6-8	1.5-3.5	6-10	2-4
primario y filtro biológico	2-3	6-8	1.5-3.5	6-10	2-4
Primario y activado	1.5-2.5	7-9	1.5-4	6-12	2-4
Activado	4-6				

El ácido sulfúrico y la cal sólo se emplean para fijar el pH ideal para la floculación que puede variar en cada caso.

El sulfato férrico comercial se usa también en algunas ocasiones en vez del cloruro férrico y su dosificación es, aproximadamente, 1.6 veces superior a la de éste.

El sulfato de aluminio igualmente se emplea, sobre todo, en procesos de elutriación de lodos. La fragilidad de los flóculos producidos hace que éstos se tengan que manejar con cuidado.

Resumiendo puede decirse que el uso de un reactivo u otro depende del costo de los productos en el punto de aplicación, del valor del equipo de dosificación y del rendimiento que se quiera obtener del secado mecánico posterior.

La dosificación de estos reactivos se debe efectuar de forma que se consiga una mezcla perfecta con el lodo y un determinado tiempo de contacto antes del secado posterior.

*b) Acondicionamiento térmico.*

El acondicionamiento térmico, se efectúa mediante calentamiento del lodo durante un corto periodo de tiempo y bajo una determinada presión. Como consecuencia de este proceso la estructura del lodo varía, perdiendo a la vez agua libre y agua unida a su estructura y quedando prácticamente sin olor y esterilizado.

El lodo se precalienta al pasar por un cambiador de calor antes de entrar en el reactor en el que la temperatura se eleva alrededor de 200° C con una presión entre 10 y 15 atm.

El tiempo normal de permanencia del lodo en el varía de 20 a 60 min. Este intervalo es importante pues influye en la transformación de los componentes del lodo.

A la salida del reactor se descargan los lodos a través del cambiador de calor para recuperar parte del mismo; posteriormente se envían a un tanque de espesamiento. De éste, el lodo sale con una concentración del 30-50% de sólidos y pasa directamente a un filtro de vacío con rendimiento de dos a tres veces superior al normal en los procesos que no llevan acondicionamiento térmico.

En la tabla 3.3 se indican las características del secado de lodos con tratamiento térmico.

En la figura 3.4 se muestra un esquema completo de este proceso aplicado a la oxidación húmeda.

La concentración de estos lodos, una vez secados sin necesidad de acondicionamiento químico, será del 30 al 50% de sólidos, dependiendo del grado de oxidación efectuado en el acondicionamiento térmico.

Este proceso puede complementarse alcanzando el máximo posible de oxidación si se aumentan presiones y temperaturas. Este sistema se conoce como oxidación húmeda.

En los procesos de acondicionamiento térmico, los lodos se espesan después de salir del reactor. El sobrenadante que resulta del espesamiento, debido a su gran índice contaminante que puede llegar a las 4,500 ppm de  $\text{DBO}_5$ , el cual debe ser introducido poco a poco en la entrada del tratamiento o tratado por separado.

TABLA 3.3 SECADO DE LODOS CON TRATAMIENTO TÉRMICO.

Equipo	Concentración de la torta % sólidos totales	Porcentaje de sólidos hidrolizados	Incremento de la capacidad de secado respecto a la de los sistemas sin tratamiento térmico
Filtración al vacío	35-45	95	200-300
Centrifugado	40-55	80-90	200-300
Filtro prensa	50-65	100	200-300

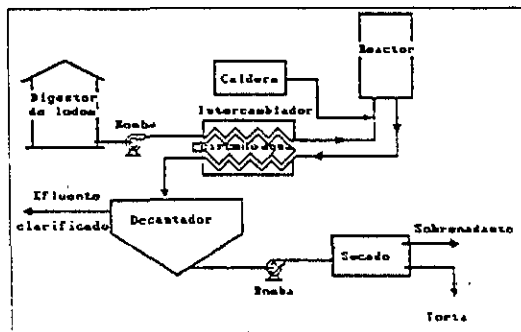


FIGURA 3.4 ESQUEMA GENERAL DE UN SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO.

### c) Otros acondicionamientos

Sólo hay que indicar que, actualmente, se están tratando a escala de laboratorio los acondicionamientos por congelación y radiación.

Se sabe que, para una filtración posterior, la congelación es más efectiva que el acondicionamiento químico. También parece que la radiación puede mejorar la filtrabilidad pero actualmente es inviable por su gran costo.

## 3.4 DESHIDRATACIÓN Y SECADO

La deshidratación de lodos se lleva a cabo mediante equipo mecánico o en lechos de secado, hasta alcanzar concentraciones de sólidos de 30% o más, dependiendo del método empleado. Normalmente, para facilitar la deshidratación se requiere un acondicionamiento previo (térmico o químico), que proporciona al lodo una estructura suficientemente rígida para permitir que el agua drene más fácilmente.

Por otra parte, el objeto del secado térmico es eliminar la humedad del lodo de modo que se facilite su incineración o pueda procesarse para ser utilizado en la fabricación de fertilizantes. El contenido de humedad del lodo seco debe ser inferior a 10%, por lo que el consumo de energía es elevado y el equipo necesario costoso (Metcalf y Eddy, 1979).

### **3.4.1 Lechos de secado**

Los lodos digeridos, ya sea por digestión aerobia o anaerobia, necesitan un proceso de secado dada la gran cantidad de agua que todavía contienen. El método más simple es el de deshidratación en lechos o eras de secado, los cuales están formados por un sistema de drenaje, normalmente constituido por tuberías de concreto poroso, así como por una capa de grava de unos 30 cm de espesor y otra de arena de diferentes granulometrías con unos 15 cm de grosor. La arena en contacto con el lodo suele tener de 0.5 a 2.5 de tamaño efectivo y un coeficiente de uniformidad inferior a 5.

Estos lechos son rectangulares de 4 a 6 m de ancho y una longitud de 8 a 12 m. Por un canal lateral entra la tubería de lodos, los cuales mediante compuertas o válvulas se distribuyen por el interior de los lechos.

El drenaje de cada lecho vierte a un drenaje general que se lleva a la entrada de la instalación de tratamiento.

El lodo procedente del digestor debe entrar por gravedad al lecho, procurándose evitar su bombeo para impedir la desgasificación del mismo. Este lodo se encuentra sometido a una presión proporcional a la altura del digestor; consecuentemente, lleva gases disueltos que se desprenden al distribuirse a cada lecho. Es por esto que el lodo, algunas veces, forma espumas al introducirse en los lechos de secado.

El secado inicial, que es el más importante, se debe a la infiltración y tiene lugar en las primeras horas. El secado posterior, se debe a la evaporación (en su mayor parte) y es responsable del agrietamiento de la capa superior al desecarse ésta.

El aspecto de las grietas indica someramente cómo ha sido la digestión del lodo. Pocas y pequeñas denotan un lodo bien digerido, por otro lado, muchas y grandes, indican que el lodo digerido es rico en agua por su contenido en lodos activos. Pocas grietas y muy grandes muestran lodo mal digerido.

La superficie de secado varía según el clima del país, pues las condiciones meteorológicas, como es natural, influyen considerablemente en el secado por evaporación.

El tiempo de secado depende del espesor de la capa de lodo que vierte sobre el lecho.

En algunas instalaciones existen lechos de secado cerrados y acristalados como invernaderos que garantizan el vertido del lodo aun con mal tiempo. En este tipo de instalaciones necesariamente debe haber ventilación, teniendo en cuenta los olores desprendidos.

La tabla 3.4 muestra las medidas que deben tener los lechos de secado para cuatro tipos de procesos bajo diferentes condiciones.

TABLA 3.4 SUPERFICIES DE LECHOS DE SECADO SEGÚN EL TRATAMIENTO DE QUE PROCEDAN LOS LODOS

TIPO DE TRATAMIENTO	SUPERFICIE EN m <sup>2</sup> /hab	
	Lechos descubiertos	Lechos cubiertos
Primario	0.092	0.069
Filtro percolador	0.14	0.12
Lodos activados	0.16	0.12
Precipitación química	0.18	0.14

Los rendimientos de los lechos de secado, partiendo de un lodo digerido con un contenido de agua superior al 95%, llegan hasta una reducción del 60%; siendo el 80% del secado debido al filtrado y el resto, a la evaporación.

Pueden obtenerse mejores resultados en lodos con gran contenido de agua añadiéndoles un acondicionador químico, floculante o polielectrolito.

La carga de lodos varía de 50 a 125 kg/m<sup>2</sup> x día para los lechos abiertos y de 60 a 200 kg/m<sup>2</sup> x día para cerrados ya que éstos están protegidos contra la lluvia.

Al separarse los lodos secos del lecho, manual o mecánicamente, se elimina siempre una pequeña capa de arena superficial. Este debe reponerse periódicamente para el buen funcionamiento de la unidad. También es conveniente filtrar sobre la arena aguas limpias que arrastren los pequeños sólidos que se encuentran en las conducciones del drenaje, impidiendo su paulatino atascamiento.

### 3.4.2 Filtración al vacío

Este proceso de filtración es el que más uso tiene para la deshidratación de los lodos.



Los tipos de filtros de vacío empleados son los de tambor o los de disco. Para los lodos de aguas residuales se usan los de tambor rotativo y carga exterior con alimentación por la parte inferior.

El lodo entra por la parte inferior del filtro donde se agita continuamente para evitar su decantación. En el tanque donde se sitúa el lodo, está sumergido el tambor rotativo del filtro que se mueve a una velocidad determinada en el sentido en que se indica por la flecha. El tambor está dividido en segmentos, cada uno de los cuales va unido a una válvula distribuidora por lo que se hace el vacío necesario. La aplicación de vacío en el sector en contacto con los lodos hace que parezca una torta en la superficie del tambor del filtro. Posteriormente, se separa el líquido filtrado, es lavado y se hace llegar el aire de soplado para despegue de la torta antes de que el raspador la desprenda totalmente del tambor.

La operación de secado por filtro rotativo de vacío resulta muy variable pues depende de muchos parámetros. El principal es la naturaleza del lodo y también tiene su importancia el acondicionamiento químico del mismo. La concentración de los lodos de entrada al filtro debe ser alrededor del 8% en peso.

Los filtros rotativos de vacío se construyen con superficie de 2 a 60 m<sup>2</sup> y van provistos de varios tipos de tela filtrante. Estas pueden ser de muy diversos materiales: algodón, lana, nylon, dracan y otros de tipo sintético: fabricándose con diferentes porosidades. También existen para usos determinados en acero inoxidable.

El acondicionamiento de lodos húmedos es necesario para alcanzar los rendimientos normales en los filtros de vacío. Los lodos con acondicionamiento permiten eliminar el agua más rápidamente generando una torta más espesa e incrementando la velocidad del cilindro del filtro.

El rendimiento de los filtros se expresa en kg de sólidos seco/m<sup>2</sup> x seg. La velocidad y eficiencia de los filtros al vacío depende de las características del lodo, los cuales varían considerablemente. Generalmente, un lodo deshidratado por filtración al vacío puede producir una torta con un 15 a 25% de sólidos totales.

Ya que algunas veces la torta producida se seca mediante combustión húmeda o incineración, es fundamental que se alcance la sequedad prevista para no tener grandes consumos de combustible. Cuando se trata de lodos para una incineración posterior, la torta debe tener del 60 al 70% de humedad.

En la tabla 3.5 se indican algunos rendimientos típicos de filtros de vacío para lodos con acondicionamiento.

**TABLA 3.6 RENDIMIENTOS TÍPICOS DE FILTROS DE VACÍO PARA LODOS ACONDICIONADOS**

TIPO DE LODO	TORTA (% ST)	RENDIMIENTO kg/m <sup>2</sup> .h
<b>Lodos no digeridos</b>		
Primario	25-30	24-50
Primario + filtro percolador	20-26	15-29
Primario + lodos activados	16-24	10-24
Lodos activados	12-18	5-10
<b>Lodos digeridos</b>		
Primario + filtro percolador	20-28	20-29
Primario + lodos activados	20-24	15-24
<b>Lodo primario con:</b>		
Baja conc. de cal	25-30	15-29
Alta conc. de cal	30-40	24-50
Poliectrolito	25-38	39-50

FUENTE: WPCF y ASCE, 1982

Cuando no se conoce la calidad del lodo, se puede estimar un rendimiento de los filtros de 20 kg/m<sup>2</sup> x hr.

### 3.4.3 Centrifugación

La centrifugación es un proceso empleado para el espesado de lodos desde 1920. La centrifuga de discos es la unidad que más frecuentemente se usa para espesar los lodos provenientes del tratamiento de las aguas residuales.

Su funcionamiento se basa en la separación sólido-líquido por diferente densidad y espesamiento de lodos, sometiéndolos a fuerzas centrífugas de hasta 5,000 veces la gravedad.

La elección de la centrifuga a usar debe estar basada en el estudio del lodo a desecar y en la práctica en este tipo de secado. La selección se realiza con base en el tipo de sólidos, consumo de coagulantes, caudal tratable y concentración de la torta de descarga.

Para aguas residuales, hay tres tipos fundamentales de centrifugas:

#### a) Centrifugas de cesta

Estas centrifugas suelen ser pequeñas, usándose incluso en algunos casos para hacer pruebas piloto. El tanque tiene un diámetro entre 0.3 y 1.20 m.

Las centrifugas de cesta operan normalmente entre 1,000 y 1,300 veces la fuerza de gravedad, aumentando la concentración de la torta y la clarificación del líquido centrifugado al incrementar la aceleración de la máquina. Sólo admiten caudales de tipo medio y dan como resultado una gran recuperación de sólidos normalmente sin coagulante.

Una de las características de este tipo de centrifugas son las rastras automáticas para la eliminación de la torta colocadas en el interior de la cesta. También cuenta con indicadores de espesor de torta, colador del líquido dentro de la centrifuga.

Estas centrifugas son discontinuas, teniendo que interrumpirse el trabajo durante unos minutos para la descarga de la torta. El ciclo completo de centrifugación varía entre 6 y 30 min.

La recuperación de sólidos del 90% o más permiten obtener concentraciones de sólidos de 16-25% para lodo primario crudo y digerido, 18-26% para lodo activado con primario y 12-15% para lodos activados.

Los caudales a tratar en estas centrifugas son pequeñas al ser discontinuas y tener que parar para extraer la torta. El caudal máximo por ciclo no suele sobrepasar los 180 l/min. Siendo la concentración de la torta pequeña, del 10 al 20% en sólidos totales. El consumo de energía eléctrica es bajo.

#### b) *Centrifugas de tornillo sinfín*

Este tipo de centrifuga es el más usado en la actualidad para lodos de aguas residuales industriales al admitir grandes cantidades de sólidos en suspensión, pudiéndose eliminar en continuo la torta concentrada. Por lo tanto, al no tener que parar la máquina, los caudales que se pueden tratar son grandes.

La aceleración de estas máquinas varía de 2,000 a 4,500 veces la fuerza de gravedad. El movimiento de la cesta y el del tornillo sinfín son independientes, existiendo la posibilidad de que ambos sean movidos por un solo motor y la transmisión ala cesta sea mediante poleas, o lo sean por motores autónomos.

El tornillo sinfín debe estar protegido por un dispositivo diferencial que se dispara parando instantáneamente la máquina ante cualquier sobrecarga.

La cesta va cubierta por una carcasa para eliminar olores y ruidos. Esta es, además, un elemento de seguridad para evitar accidentes durante el funcionamiento.

La pieza más sensible de estas máquinas es el tornillo sinfín que debe ser revisado cada seis meses de funcionamiento.

### c) Centrifugas de discos

Estas centrifugas son aconsejables para la concentración de lodos activos y, en general, para lodos de partículas muy finas, como pueden ser los resultantes de la floculación con alúmina de las aguas potables y residuales. No son aconsejables para lodos fibrosos.

Con estas centrifugas se pueden manejar grandes caudales con relativa eficacia en el líquido clarificado. Dados sus grandes campos centrífugos, que pueden llegar hasta los 8,000 G; es posible usarlas para separar emulsiones.

La aplicación fundamental de este tipo de centrifugas es la concentración del lodo activo sin mezcla de lodo primario y con bajas concentraciones, de 0.3 a 1.0% en sólidos en suspensión. Otro uso importante, es la separación de aceites de emulsiones acuosas en refinerías.

En la instalación de estas máquinas es muy aconsejable la colocación de rejillas o dilaceradores con objeto de evitar posibles obstrucciones. Un sistema eléctrico desconecta el motor de accionamiento en cuanto hay sobrecargas.

Otro punto de gran interés es la sequedad de la torta de lodos y su posterior manejo en función de los equipos existentes. Por último, siempre se debe considerar el costo de las máquinas y de los equipos auxiliares como, por ejemplo, el sistema de dosificación de polielectrolitos.

Como resumen, se presentan en la tabla 3.6, los rendimientos normales para aguas residuales.

TABLA 3.6 RENDIMIENTOS TÍPICOS DE CENTRIFUGAS

TIPO DE CENTRIFUGAS	TIPO DE LODO	SÓLIDOS RECUPERADOS (%)	SÓLIDOS EN LA TORTA (%)	ADICIÓN DE REACTIVOS (kg/l)*
Sinfin	Primario	65-80	30-35	0
Sinfin	Primario	80-95	25-35	1-4
Sinfin	Primario digerido	75-85	30-35	0
Sinfin	Primario digerido	80-95	22-30	1-4
Sinfin	Primario y secundario	50-70	18-22	0
Sinfin	Primario y secundario	80-95	15-20	2-6
Cesta	Primario y secundario	90-97	11-14	0
Sinfin	Primario digerido y secundario	55-70	23-30	0
Sinfin	Primario digerido y secundario	80-95	20-25	2-5
Sinfin	Secundario	85-95	5-15	4-705
Cesta	Secundario	90-95	9-11	0
Disco	Secundario	85-90	5-7	0
Sinfin	Aerobio digerido	80-90	10-18	3-10
Cesta	Aerobio digerido	90-95	9-12	0
Sinfin	Primario con cal	55-70	40-60	0
Sinfin	Primario con cal	80-95	15-30	0.5-2.5
Sinfin	Terciario con cal (fosfatos)	35-70	55-70	0
Sinfin	Ablandamiento con cal	60-90	40-60	0
Sinfin	Ablandamiento con cal	90-100	35-50	1-4
Cesta	Floculación con alumbre	90-95	8-20	0

\* kg de polímero añadido por tonelada de sólidos secos alimentados

### **3.4.4 Filtros prensa**

En un filtro prensa, la deshidratación se realiza forzando la evacuación del agua presente en el lodo por la aplicación de una presión elevada. Las ventajas de los filtros prensa incluye: 1) altas concentraciones de sólidos en la torta, 2) obtención de un líquido filtrado muy clarificado, 3) elevada captura de sólidos y 4) bajo consumo de productos químicos. Sin embargo, la principal desventaja son los altos costos de mano de obra y las limitaciones de la vida de telas del filtro.

Para deshidratar el lodo se han utilizado distintos tipos de filtros prensa. Uno de esos tipos consiste en una serie de placas rectangulares, ranuradas en ambos lados, que están colocadas enfrentadas entre sí en posición vertical sobre un bastidor de altura fija o variable. Una tela filtrante se cuelga o ajusta sobre cada placa. Las placas se mantienen juntas con fuerza suficiente para que se adhieran herméticamente y puedan así resistir la presión aplicada durante el proceso de filtración. Para que las placas se mantengan unidas se utilizan prensas hidráulicas o tornillos accionados mecánicamente.

Durante el funcionamiento, se bombea lodo químicamente acondicionado al espacio existente entre las placas y se aplica a una presión (de 40 a 150 N/cm<sup>2</sup>) que se mantiene de 1 a 3 horas, forzando el líquido a pasar a través de la tela filtrante y de orificios de salida de las placas. Estas se separan seguidamente y se extrae la torta del lodo. El filtrado es normalmente retornado a la entrada de la planta de tratamiento. El espesor de la torta de lodo varía de 2.5 a 3.8 cm aproximadamente y el contenido de humedad, del 55 al 70%.

### **3.4.5 Filtros de banda horizontales**

En las últimas décadas nuevos sistemas de deshidratación mecánica han sido desarrollados. Estos se han clasificado de forma global como filtros de banda horizontales e incluyen: concentradores de tamiz móvil, filtro prensa de banda, sistemas de deshidratación capilar y filtros rotativo por gravedad. Los cuatro sistemas utilizan bandas continuas montadas horizontalmente sobre los cuales se descarga y deshidrata el lodo. La complejidad de funcionamiento y las necesidades energéticas son similares. La captura de sólidos y el contenido de humedad de la torta son muy parecidos a los conseguidos por medio de filtros de vacío.

Existen otros tipos de métodos para el deshidratado y secado de lodo, como son: Concentrador de tamiz móvil, filtros prensa de banda, sistemas de deshidratación capilar, concentración mediante el filtro rotativo por gravedad, etc..

---

### 3.5 INCINERACIÓN

Cuando no se cuenta con sitios para desechar los lodos a una distancia que resulte económica, o si el lodo contiene materias tóxicas, la mejor solución es incinerarlo. Esta operación se lleva a cabo en hornos de hogar múltiple; la operación es normalmente autosustentable cuando los lodos de agua residual se deshidratan hasta un 25% en sólidos (los sólidos del agua residual tienen un valor calorífico que comúnmente es 20 MJ/kg). Después de la incineración, la ceniza residual equivale únicamente al 5 ó 10% de los sólidos originales, con lo que disminuye en gran parte el problema de la eliminación. Sin embargo, desechar los lodos de esta manera significa un gran costo de capital y un costo de operación considerable.

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.

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.

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. 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 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°C y 1000°C y de 350°C en el fondo del incinerador.

La incineración en 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. 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 por una chimenea.

El sistema de secado instantáneo se utiliza para el secado 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.

Se puede usar la incineración como el método último de disposición de lodos, y cuando éstos han sido desecado para obtener un contenido mayor de aproximadamente 30%, el calor de combustión de los sólidos de los lodos es suficiente para evaporar el contenido residual de agua. No obstante la incineración no resuelve completamente el problema de la disposición, porque todavía es necesario disponer la ceniza residual, descargándola sobre el terreno o en el mar. La ceniza se puede también aprovechar en el acondicionamiento de lodos y como un auxiliar filtrante en la desecación.

### **3.6 DISPOSICIÓN DE LODOS Y CENIZAS**

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 acondicionador de suelos;
- Disposición sobre terrenos;
- Confinamiento controlado;

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

#### **3.6.1 Relleno sanitario**

El relleno, por ejemplo, de una mina abandonada, constituye un método de disposición adecuado sólo para lodos y sólidos que hayan sido estabilizados de tal modo que no se produzcan condiciones de descomposición u otras molestias. El lodo digerido, la arena limpia y el residuo de incineración pueden evacuarse por este método en condiciones de seguridad.

Es un método de disposición en el que el lodo es depositado en un área específica, con o sin residuos sólidos y en terrados debajo de una cubierta de suelo.

---

El relleno es primeramente un método de disposición en el que no se recuperan nutrientes y solo se recupera energía.

Es necesario disponer de un área para el relleno al igual que para la aplicación al suelo, sin embargo hay una diferencia importante. Cuando el lodo es depositado en un relleno sanitario, la degradación anaerobia ocurre porque el oxígeno es insuficiente para la descomposición aerobia. Las condiciones anaerobias degrada el lodo más lentamente que los procesos aerobios.

Los procedimientos sanitarios apropiados de la disposición en relleno minimizan muchos de los problemas relativos a la salud y el ambiente. Sin embargo, la contaminación de las aguas subterráneas por constituyentes presentes en el lodo del relleno es una preocupación constante. La contaminación de agua subterránea puede ser difícil de detectar, generalmente se detectan cuando el daño ha ocurrido y si ha sido detectada es muy difícil de eliminar.

Estos problemas se pueden prevenir con la planeación y elección del sitio adecuado para la disposición.

### **3.6.2 *Uso como acondicionador de suelos***

El lodo de agua residual tiene valor como acondicionador de suelos ya que contiene cantidades importantes de nitrógeno y fósforo. Los lodos que provienen de instalaciones sin descargas industriales importantes pueden ser destinados de inmediato a los terrenos agrícolas. Con los lodos que contienen materiales potencialmente tóxicos, como metales pesados, no es posible utilizar la tierra agrícola para su desecho. Frecuentemente se requiere una digestión anaerobia de los lodos anterior a su disposición en tierra, para asegurar la destrucción de los microorganismos patógenos que pudieran estar presentes en el lodo crudo. La aplicación del lodo a la tierra agrícola se hace cuando está aún húmedo. Se transporta en un carro-tanque o por un sistema de irrigación por aspersión. Como las condiciones climáticas pueden impedir la aplicación en ciertos períodos, se debe contar con suficiente capacidad de almacenaje para cubrir estas situaciones. Se necesita un área para eliminación en tierra de 20 m<sup>2</sup>/persona o más, lo que depende de prácticas agrícolas, tipo de suelo y clima.

#### **3.6.2.1 *Composteo***

El composteo de lodos de aguas residuales con basura doméstica producen un material estable con buenas propiedades como acondicionador de suelos, pero con poca reducción en volumen. Por esta razón, la fabricación de composta sólo es justificable si hay un mercado para el producto. Todo el lodo del agua residual y toda la basura de una comunidad producen una mezcla muy húmeda para hacer la composta y es necesario deshidratar el lodo para tener un 25% de sólidos y que el proceso opere satisfactoriamente.



El composteo es un proceso por el cual la materia orgánica experimenta una degradación biológica hasta dar lugar a un producto final estable. El lodo convertido adecuadamente es composta es un material sin problemas de carácter sanitario, exento de olores y de características similares al humus. Aproximadamente, del 20 al 30% de los sólidos volátiles se convierten en bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua. Además, dado que el lodo se procesa, generalmente en un intervalo de temperaturas termófilas, el producto final está prácticamente pasteurizado. La composta formada a partir del lodo puede utilizarse como acondicionador del suelo. Aunque el proceso funciona correctamente, el problema principal consiste en la carencia de un mercado para el producto final estabilizado; sin embargo, actualmente existe un renovado interés por el composteo.

La mayoría de las operaciones de formación de composta consta de tres etapas básicas: 1) preparación de los residuos a tratar, 2) descomposición de los residuos preparados y 3) preparación y comercialización del producto. La recepción, clasificación, separación, reducción de tamaños, adición de humedad y nutrientes son parte de la etapa de preparación. Para llevar a cabo la etapa de descomposición, se han desarrollado varias técnicas como la del composteo por apilamiento donde los residuos preparados se acumulan formando montones dispuestos en un cambio abierto. Los montones son removidos una a dos veces por semana durante un periodo de aproximadamente 5 semanas. Normalmente, el material se cura durante un periodo adicional de 2 a 4 semanas para asegurar su estabilización. Como alternativa al composteo por apilado, se han desarrollado varios sistemas mecánicos, incluyendo el proceso de pilas aireadas. Con un control cuidadoso, es posible producir un humus en un tiempo de 5 a 10 días utilizando un sistema mecánico. A menudo, la composta formada es extraída, tamizada y curada durante un periodo adicional de aproximadamente 3 a 4 semanas. Una vez que la composta ha sido curada, ya está preparada para la tercera etapa, que es la preparación y comercialización del producto. Esta etapa puede incluir la trituración final, mezclado con diversos aditivos, granulado, secado, almacenamiento, transporte y en algunos casos, la comercialización directa.

Generalmente, es preferible utilizar un sistema de composteo mecánico cerrado en lugar de uno abierto, en zonas excesivamente húmedas o frías, por que permite conseguir un mejor control del proceso.

El lodo puede ser convertido en composta tal como se tiene del tratamiento previo, o bien en combinación con virutas de madera u otros residuos sólidos (composteo combinado).

---

a) *Composteo combinado con virutas de madera:*

El composteo combinado del lodo con virutas de madera requiere, generalmente, la deshidratación previa de éste, antes de mezclarse con el material de relleno. El más logrado de los procesos de composteo combinado con virutas de madera parece ser el proceso de pilas aireadas. En él, primeramente el lodo se mezcla con virutas de madera, para posteriormente amontonar el material mezclado en una pila y se cubre con una capa de 300 mm de composta tamizado para su aislamiento y control de olores. El oxígeno se suministra mediante aireación forzada. Después de 21 días, más 2 días de secado, se separan las virutas de madera que vuelven a reciclarse.

Tras el curado un período adicional de 30 días la composta está lista para la preparación y comercialización del producto. El lodo de alimentación puede ser tanto digerido como crudo; sin embargo, el lodo digerido se transforma en composta más lentamente que el lodo crudo, sobre todo durante períodos fríos o húmedos, debido a la carencia de suficiente materia digerible capaz de suministrar energía para la rápida oxidación biológica. Por otro lado, los sistemas de composteo que utilizan lodos crudos, son a menudo, más susceptibles a los problemas de olores. El olor no ha presentado problemas en el proceso de pilas aireadas.

b) *Composteo combinado con residuos sólidos:*

La formación de composta con lodos y residuos sólidos municipales no requiere, generalmente, la deshidratación. Los lodos de alimentación pueden tener un contenido de sólidos variable entre el 5 y el 12%. Se recomienda una mezcla de residuos sólidos con lodo en proporción de 2 a 1, aunque de hecho, puede mezclarse cualquier cantidad de lodo con residuos sólidos a condición de que el lodo se deshidrate adecuadamente. Los residuos sólidos, deben sufrir una clarificación y trituración en un molino de martillos previamente a su mezclado con el lodo.

### **3.6.3 Disposición sobre terrenos**

El lodo deshidratado puede disponerse extendiéndolo sobre tierras de labranza seguido de la rotura del terreno una vez que haya secado. El lodo deshidratado húmedo puede incorporarse directamente al suelo por inyección. El humus del lodo acondiciona el suelo y mejora su capacidad de retención de humedad. Las tasa de aplicación han variado entre 2.3 y 5.6 cm/año de lodo con una concentración del 2 al 5% de sólidos.

### **3.6.4 Confinamiento controlado**

Si existe un lugar adecuado, puede utilizarse un confinamiento controlado para disposición del lodo, grasas y arenas, tanto si están estabilizados como no. La economía en el transporte del lodo dictará, en la mayoría de los casos, la conveniencia de efectuar su deshidratación para reducir el volumen, dando como resultado un ahorro sustancial. Este método es muy aconsejable si al mismo tiempo se utiliza para la eliminación de basuras y otros residuos sólidos de la comunidad. En un verdadero confinamiento controlado, los residuos se depositan en una zona prefijada, se compactan insitu con un tractor o apisonadora, y se cubren con una capa de 0.30 metros de tierra limpia. Cubriendo cada día los nuevos residuos que se van depositando las condiciones aludidas anteriormente causantes de molestias (tales como olores y moscas) se reducen a un mínimo.

La selección de la zona de ubicación del vertedor debe tener en cuenta las molestias y los riegos para la salud que puedan causarse. Debe disponerse de camiones que transporten lodo húmedo y arena para llegar al destino sin pasar por zonas muy pobladas o barrios comerciales. Es importante construir un buen drenaje de la zona elegida de modo que no se produzca la contaminación del agua subterránea o de las corrientes superficiales. Después de varios años, durante los cuales los residuos se descomponen y compactan, el terreno resultante puede usarse como lugar de esparcimiento u otras finalidades siempre que no haya asentamientos granulares que lo imposibiliten.

## CAPITULO 4

### APOYO DE LOS ASPECTOS TEÓRICOS DE LA INGENIERÍA CIVIL PARA DETERMINAR LOS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCIÓN DE UN TREN DE TRATAMIENTO DE LODOS.

Los criterios utilizados para establecer un tren de tratamiento adecuado a las necesidades específicas de cada caso se basan en la evaluación de las características del lodo por tratar, la forma de utilización o disposición final, algunos factores externos, y en el conocimiento de las interrelaciones entre los sistemas que constituyen las diferentes etapas del tratamiento.

Entre los factores referentes a las características del lodo se encuentran los siguientes: caudales promedio, tipo de lodos (primarios, biológicos, químicos), concentración de sólidos totales, concentración de sólidos suspendidos, contenido de material orgánico, presencia de productos químicos, propiedades generales del lodo (densidad, viscosidad, etc.).

Entre los factores externos se encuentran los siguientes: limitaciones económicas, instalaciones existentes, limitaciones de espacio, condiciones ambientales, expectativas para el manejo del lodo tratado y método de operación de la planta.

#### 4.1 CALIDAD DE LOS LODOS DESPUÉS DEL TRATAMIENTO

Debido a la importancia de conservar un lodo de buena calidad en el proceso, se han desarrollado diferentes índices para controlarla.

##### 1.- Índice del volumen de los lodos *IVL*

$$IVL = \frac{\text{volumen sedimentado de lodos en 30 min (\%)}}{SSLM (\%)}$$

El *IVL* varía de 40 a 100 para un buen lodo, pero puede exceder de 200 para un lodo deficiente con tendencia a esponjarse. El esponjamiento se usa para describir un lodo con malas características de sedimentación, que frecuentemente la causan microorganismos filamentosos que existen en plantas de tratamiento con agua residual fácilmente degradable, baja en nitrógeno y donde el OD en el licor mezclado es bajo. Un problema que se presenta cuando se usa el *IVL* como una medida de las propiedades de sedimentación de un licor mezclado es que los

valores obtenidos son afectados por la concentración de sólidos, así como también por el diámetro del recipiente que se usa para la prueba. Para superar estos problemas, se lleva a cabo la prueba del VEA (volumen específico agitado) con una concentración fija de SS en el fluido de 3500 mg/l, en un recipiente común de 100 mm de diámetro, agitado a 1 rpm.

### 2.- Índice de densidad de lodos

$$\text{IDL} = \frac{\text{SSLM} (\%) \times 100}{\text{volumen sedimentado del lodo en 30 min} (\%)}$$

El IDL varía desde 2 para un buen lodo hasta 0.3 para un lodo deficiente.

### 3.- Tiempo de residencia medio de las células $\theta_c$

$$\theta_c = \frac{\text{volumen de la zona de aereación} (\text{m}^3) \times \text{SVSLM} (\text{mg/l})}{\text{tasa de pérdida de lodos} (\text{m}^3/\text{d}) \times \text{SSV de los lodos} (\text{mg/l})}$$

## 4.2 MANEJO HIDRAULICO DE LOS LODOS

Todos los lodos y suspensiones son exclusivamente sustancias pseudohomogéneas. Los sólidos frescos de la sedimentación libre son especialmente de diversa composición; los sólidos digeridos y los lodos activados lo son en menor grado; los flóculos de aluminio y hierro son los menos diversos. A causa de que muchos lodos de aguas residuales son fluidos no newtonianos con propiedades plásticas en vez de viscosas, su resistencia al flujo es una función de su concentración. La hidráulica de los flujos se complica también porque la mayor parte de los lodos son *fixotrópicos*. Sus propiedades plásticas cambian durante la agitación y turbulencia. Los gases o el aire desprendidos durante el flujo se suman a la dificultad para identificar el comportamiento hidráulico probable. Como es lógico, las pérdidas fundamentales de fricción aumentan con el contenido de sólidos y disminuyen con la temperatura. En general, persiste el flujo laminar o de transición a velocidades relativamente altas, como de 0.45 a 1.37 m/s para suspensiones espesas que fluyan en tuberías de 12.7 a 30.5 cm de diámetro. A velocidades turbulentas, todas las suspensiones se comportan en forma más similar a la del agua.

La siguiente relación para el flujo laminar de líquidos plásticos en tuberías se basa en la ecuación de Poiseuille para líquidos viscosos:

$$h = \frac{32}{g} \frac{v}{d^2} \left( \eta + \frac{1}{6} \frac{\tau_y}{\rho} \frac{d}{v} \right) \quad (4.1)$$

Donde:

- $h$ ; es la pérdida, en pies de columna de lodos;
- $l$  y  $d$ ; son respectivamente la longitud y diámetro de la tubería;
- $v$ ; es la velocidad de los sólidos y de su líquido transportante; y
- $\eta$  y  $\tau_y$ ; son respectivamente, su coeficiente de rigidez y el esfuerzo de corte en el punto de fluencia.

Los términos dentro del paréntesis son análogos a la viscosidad cinemática de un líquido newtoniano y poseen las mismas dimensiones. Cuando la mezcla es delgada, su resistencia al corte en el punto de fluencia se aproxima a cero y el coeficiente de rigidez se une a la viscosidad dinámica del líquido.  $v$ . Si los factores del flujo plástico evaluados en el paréntesis se incorporan en un coeficiente de rigidez cinemática  $v_p$ , el número de Reynolds se convierte en  $R = vd/v_p$ , y persistirá el flujo laminar a valores inferiores a  $R = 2,000$  como sucede en el flujo viscoso.

La tixotropía hace difícil la determinación de  $\eta/\rho$  y  $\tau_y/\rho$ . Ni las pruebas de flujo ni la viscosimetría son completamente satisfactorias. Las magnitudes reportadas son escasas. Son ejemplos  $\eta = 0.03$  y  $\tau_0 = 0.1$  para lodos espesos digeridos. Los lodos activados frescos, siendo bajos en sólidos (2% o menores), no tienen resistencia al corte medible, y su valor  $\eta/\rho$  es substancialmente el mismo que el de la viscosidad cinemática del agua.

Para flujo turbulento, la pérdida de carga de los sólidos de aguas residuales bastante homogéneos, los sólidos primarios digeridos y los lodos activados, por ejemplo, aumento en no más de 1% por cada 1% de sólidos. Los sólidos frescos de sedimentación libre se transportan con pérdidas de 1.5 a 4 veces mayores que las del agua. Cuando las velocidades de flujo son pequeñas, los sólidos más grandes y más pesados se sedimentan y obstruyen el flujo. Entonces, aumentan las velocidades en la sección de área transversal reducida hasta que el material depositado es arrastrado. Sin embargo, pueden haber obstrucciones de los tubos. Las velocidades de extracción de los lodos no deben ser tan rápidas que originen que el agua atraviese los sólidos acumulados mediante *canalización*. Los conductos de los lodos se deben dimensionar acordeamente.

Las bombas de lodos, como las bombas de aguas residuales en general, deben manejar sólidos de todas clases. Las bombas de pistón y de diafragma, así como los eyectores de aire comprimido, se utilizan a pequeñas velocidades de

descarga. Para velocidades mayores de flujo, las bombas centrífugas (generalmente mayores de un tamaño de 4 pulg. o sea, 10.16 cm) proporcionan un claro suficiente para evitar que se obstruyan. Los elevadores de aire se utilizan generalmente para lodos activados y para profundidades de sumergencia no mayores del doble de la columna.

#### **4.2.1 Pérdidas de carga en las conducciones de lodos.**

##### **RÉGIMEN LAMINAR.**

La heterogeneidad de los lodos y la variabilidad de su composición hacen muy aleatoria la estimación de las pérdidas de carga y, por consiguiente, surge la necesidad de tomar algunas precauciones y coeficientes de seguridad.

El estudio de las curvas de pérdida de carga muestra que su crecimiento es relativamente bajo entre los límites correspondientes a la velocidad nula y crítica; este aumento es todavía menor entre el 50 y el 100% de la velocidad crítica.

Por consiguiente, introduciremos un error relativamente pequeño si se considera constante la pérdida de carga a cualquier velocidad dentro del régimen laminar. Esta aproximación arrastra una pequeña seguridad para velocidades inferiores a la crítica.

El coeficiente de rigidez y la fuerza de cizallamiento se han medido en numerosos ensayos con lodos mixtos; los valores determinados fueron los de dimensionamiento, es decir, aquellos que engloban la mayor parte de los valores máximos, siendo los valores medios netamente inferiores.

##### **RÉGIMEN TURBULENTO.**

De la misma forma que para el régimen laminar, los valores para el cálculo pueden tomarse de los deducidos de la fórmula de Colebrook para una rugosidad de 2 mm.

##### **PRESENTACIÓN DE LAS BASES DE CÁLCULO.**

Hemos fijado las siguientes bases de cálculo:

- La velocidad crítica varía muy poco con el diámetro; para cada concentración de lodos podemos adoptar una velocidad independiente del diámetro.
- Para cada diámetro y para cada concentración, la pérdida de carga se da (ver tabla 4.1):
  - Para cada velocidad crítica.

- Para una rugosidad de 2 mm.
  - Para velocidades inferiores a la velocidad crítica, se adoptará la pérdida de carga correspondiente a la velocidad crítica, cualquiera que sea la velocidad.
  - Para velocidades tomadas por encima de la velocidad crítica, la pérdida de carga se calculará proporcional al cuadrado de la velocidad, a partir de los valores de la tabla 4.1 son válidos para lodos mixtos con un 40-60% de lodos en exceso y frescos.

**TABLA 4.1 CONDUCCIONES DE LODO  
VELOCIDADES CRÍTICAS Y PÉRDIDAS DE CARGA**

Diámetro m/m	Concentración %					
	1	2	3	4	5	10
	Velocidad crítica					
	0.18	0.82	1.35	1.67	2.07	2.65
Pérdida de carga						
100	0.08	1.68	4.55	6.97	10.70	17.54
150	0.05	0.96	2.60	3.98	6.12	10.02
200	0.03	0.65	1.76	2.70	4.15	6.80
250	0.02	0.48	1.31	2.00	3.08	5.05
300	0.018	0.38	1.02	1.56	2.40	3.94
400	0.013	0.26	0.70	1.08	1.66	2.71
500	0.009	0.19	0.53	0.80	1.24	2.03

#### VALORES PARA OTROS LODOS.

Para lodos de calidad diferente a los anteriores, pueden aplicarse, a la tabla 4.1, los coeficientes de corrección siguientes:

- Lodos primarios frescos..... 0.5
- Lodos activados frescos..... 2.0
- Lodos mixtos digeridos..... 0.5
- Lodos primarios digeridos..... 0.4

#### VELOCIDADES PRACTICAS.

- Para concentraciones del 3% y superiores, pueden adoptarse velocidades de 0.8 y 1.20 m/s; las pérdidas de carga se indican en la tabla.

- Para concentraciones del 2% e inferiores, también pueden tomarse velocidades entre 0.8 y 1.20 m/s; las pérdidas de carga son las mismas que las del agua limpia con rugosidad de 2 mm (Fórmula de Colebrook), con un amplio margen de seguridad.



### 4.3 DISEÑO DE LAS ESTRUCTURAS DEL TREN DE TRATAMIENTO DE LODOS

Antes de el diseño estructural del tren de tratamiento se deben calcular las dimensiones de cada una de las estructuras que lo integran, una vez obtenidos se procede al diseño para cual se recomienda el siguiente procedimiento:

#### 1.- Características de los materiales a emplear.

Ejemplo:

- a) Concreto en plantilla, con  $f'c=100 \text{ kg/cm}^2$
- b) Concreto en los elementos estructurales con  $f'c=250 \text{ kg/cm}^2$
- c) Acero de refuerzo, con  $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$

Todos los materiales usados deben cumplir con los establecido en las correspondientes Normas Mexicanas, NOM.

#### 2.- Acciones consideradas.

Para el análisis de las acciones que obran sobre las estructuras se deben considerar las que a continuación se citan.

- a) Cargas muertas y vivas sobre la losa tapa.
- b) Empujes laterales del terreno sobre muros perimetrales.
- c) Empujes laterales por efectos sísmicos.
- d) Reacción del terreno sobre la losa de fondo.
- e) Presiones hidrostáticas en muros perimetrales.

#### 3.- Análisis estructural.

Una vez conocidas las cargas básicas sobre la estructura y la geometría de la misma, se procede a valorar las respuestas de esta ante las diferentes sollicitaciones, enfocándose para tal caso en los estados limite de falla y de servicio, de acuerdo con el Reglamento de Construcción del Distrito Federal de 1987. (RCDF-1987)

Para analizar los diferentes marcos que forman las estructuras se emplea un programa específico para computadora que emplea el método de las rigideces, de tal manera que se obtengan para cada uno de los elementos componentes los efectos de giro y desplazamientos correspondientes, así como fuerzas internas axiales y cortantes en función de sus propiedades prismáticas.

---

#### 4.- Diseño estructural.

Para el diseño de todos los elementos de concreto se emplea el método para estados límite, normándose para tal caso en el RCDF-1987 y sus normas técnicas complementarias.

Una vez obtenidas las fuerzas internas, como son los momentos flexionantes y las fuerzas cortantes y axiales; emanadas del respectivo análisis se multiplican por sus correspondientes factores de carga para así obtener las fuerzas internas de diseño, seguido a lo anterior se determinan las resistencias de diseño. Finalmente se verifica el estado límite de resistencia para todos los casos, comprobando que las resistencias de diseño fueran mayores o iguales que las fuerzas internas de diseño.

Por otra parte se revisan los estados límite de servicio verificando en tal caso que las deflexiones bajo la acción de cargas nominales sean menores o iguales que sus correspondientes permisibles.

##### A) Factores de carga.

- a1) Para combinación de acciones permanentes y variables 1.5
- a2) Para combinación de acciones permanentes, variables y accidentales 1.1

##### B) Factores de reducción.

- b1) Flexión
- b2) Cortante
- b3) Flexocompresión
- b4) Aplastamiento

#### **4.3.1 Factores de carga**

Los factores de carga tiene el propósito de dar seguridad adecuada contra un aumento en las cargas de servicio más allá de las especificadas en el diseño para que sea sumamente improbable la falla. Los factores de carga también ayudan a asegurar que la deformaciones bajo cargas de servicio no sean excesivas. Los factores de carga utilizados para carga muerta, carga viva, presión lateral de la tierra y de fluidos, cargas de viento y sismo, difieren en magnitud. Los factores de carga son distintos para diversos tipos de cargas debido a que, por ejemplo, es menos probable que la carga muerta de una estructura se exceda que la carga viva indica. La carga máxima de la estructura debe ser igual por lo menos a la suma de cada carga de servicio multiplicada por su factor respectivo de carga.

### **4.3.2 Factores de reducción de capacidad**

Los factores de reducción de capacidad se proporcionan para tomar en cuenta inexactitudes en los cálculos y fluctuaciones en las resistencias del material, en la mano de obra y en las dimensiones. Cada uno de estos factores bien puede estar dentro de límites tolerables, pero combinados pueden producir menor capacidad en los elementos diseñados. La ecuación básica de resistencia para una sección puede decirse que da la resistencia ideal, siempre que la ecuación sea científicamente correcta, que los materiales tengan la resistencia especificada y que los tamaños sean como en los dibujos.

## **4.4 SITIO PARA DISPOSICIÓN**

Uno de los aspectos más críticos de la aplicación del lodo al terreno consiste en encontrar un lugar adecuado para ello. Las características del emplazamiento tienen una gran influencia sobre el proyecto y la efectividad global del concepto de aplicación al terreno. El proceso de elección del sitio debe incluir una selección inicial basada en los factores y criterios que se describen a continuación. Una vez eliminados los sitios no adecuados, debe evaluarse detalladamente cada uno de los restantes, teniendo en cuenta las técnicas de operación y el impacto ambiental.

Es necesario localizar áreas para disponer los lodos, que cumpla con los siguientes requisitos:

- Permeabilidad del suelo.
- Vida media del suelo.
- Costo de transporte
- Estudio de Impacto Ambiental.

### **4.4.1 Ubicación del sitio**

Las zonas críticas son aquéllas en las que la aplicación del lodo está prohibida por las normas legales e institucionales. El aislamiento es una característica importante del lugar propuesto. Deben conocerse las distancias a zonas habitadas y cuerpos de agua (superficial o subterránea). Los requisitos mínimos varían con el clima, las características geológicas y del suelo, las técnicas de aplicación y las normas gubernamentales.

El sitio no debe estar tan aislado que carezca de acceso. La ausencia de vías de transporte cercanas, tales como ferrocarriles, carreteras o cursos de agua

---

navegables pueden requerir la construcción de caminos de acceso muy costosos o la utilización de transportes por tubería.

Se han sugerido unas pendientes máximas del terreno del 5 al 8%. Las pendientes más pronunciadas pueden conducir a la erosión y causar problemas de funcionamiento de los equipos.

En términos de regeneración del terreno o de adición de fertilizantes prácticamente pueden utilizarse cualquier suelo, particularmente el suelo agrícola para la aplicación del lodo. El grado de utilización del lodo por el suelo depende de diversas propiedades físicas y químicas del mismo. Los suelos deben tener capacidad para filtrar, amortiguar y adsorber el fango, así como para soportar el crecimiento de un cultivo. En general, los suelos deseables 1) deben tener permeabilidades moderadas (de 1.5 a 15 cm/h), 2) estar bien o moderadamente bien drenados, 3) ser alcalinos o neutros (pH mayor de 6.5) para controlar la solubilidad de los metales pesados y 4) ser profundos y de textura relativamente fina para tener una capacidad elevada de retención de humedad y de fijación de los nutrientes. Los suelos que no tienen estas propiedades pueden usarse introduciendo ciertas modificaciones.

Es particularmente importante llevar a cabo una investigación geológica para definir la naturaleza de los recursos de agua subterránea. La presencia de fallas, canales de disolución u otras conexiones similares entre el suelo y el agua subterránea disminuye la conveniencia de utilización del sitio. El efecto de la aplicación al terreno sobre la calidad y uso del agua subterránea debe ser cuidadosamente estudiado. Los riesgos sísmicos son otro factor importante en la elección del sitio.

#### **4.4.2 Factores socioculturales**

Se tiene una preocupación, sin embargo, y es que se teme que se formulen graves objeciones en contra de los lodos desde el punto de vista de la higiene. Si fuera así, los lodos deberán quemarse y convertirse en cenizas.

Desde el punto de vista de explotación este procedimiento sería, por cierto, más beneficioso, ya que los lodos podrían utilizarse como combustibles disminuyendo así el consumo de gas-oil.

#### **4.4.3 Aprovechamiento de los lodos**

Generalmente, el mercado más accesible para el lodo lo constituye las granjas cercanas, debe realizarse un análisis costo-beneficio para comparar el valor de los nutrientes con el costo de la distribución y aplicación de las diversas formas de lodo (por ejemplo, líquido, deshidratado). El precio real del lodo no

debe ser mayor que el de los fertilizantes comerciales, en términos de costos unitarios de los nutrientes disponibles .

La mejora de la producción de cultivos por aplicación del lodo puede también formar parte del esquema de comercialización. Muchos estudios realizados han demostrado incrementos, tanto moderados como elevados de la producción de maíz, alfalfa y cultivos de forraje, cuando se utiliza el lodo como fertilizante. En términos de productividad, parece ser que una tasa de aplicación entre 10 y 22 mg/ha de peso seco es comparable a la fertilización comercial. El grado de aumento de productividad depende de los tipos de suelo, de la composición del lodo, del clima y de las técnicas globales de operación, incluyendo las tasas de aplicación.

## CAPITULO 5

### PROPUESTA DE ACUERDO CON LAS NECESIDADES DE LA PLANTA.

#### 5.1 FACTORES A CONSIDERAR PARA EVALUAR LA ALTERNATIVA ADECUADA

Con base en la situación socioeconómica y tecnológica del país y en comunicaciones personales con 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), se establece que los sistemas para tratamiento de lodos más adecuados a la situación real del país son aquellos cuya operación, instalación y manejo sean más sencillos, que requiera menos equipo y que sus costos capitales, así como los de operación y mantenimiento se mantengan dentro de ciertos parámetros económicos limitados, siempre y cuando solucionen con eficiencia los problemas ocasionados por la generación de estos residuos.

La figura 5.1 muestra un diagrama de bloques que incluye los sistemas seleccionados. Para reducir el contenido de agua se recomienda el espesamiento por gravedad, deshidratado en lechos de secado y deshidratado mecánico en filtros prensa o filtros banda y para la estabilización se recomiendan la digestión aerobia, digestión anaerobia, o bien tratamiento con cal.

A continuación se describe el fundamento de la selección y algunos parámetros fundamentales para el diseño del proceso de cada uno, de manera que para integrar un tren de tratamiento, dependiendo del caso específico, se pueda hacer combinaciones de estos sistemas.

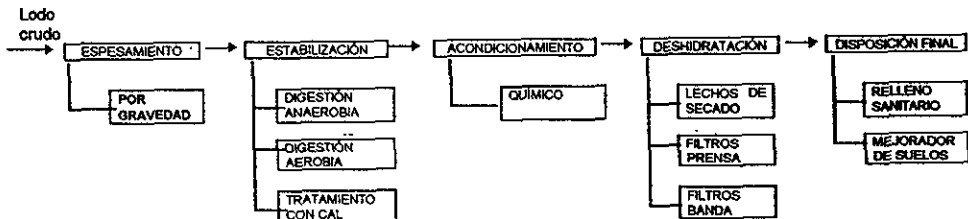


FIGURA 5.1 ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS RESIDUALES MUNICIPALES.

### **5.1.1 Espesamiento por gravedad**

Es importante considerar el espesamiento como primer paso del tratamiento, con el objeto de reducir los costos y dimensiones de los sistemas de tratamiento en las etapas subsecuentes. El método de espesamiento más común por su economía, así como por su sencillez y facilidad de operación, es el espesamiento por gravedad.

El mecanismo que rige el espesamiento por gravedad se basa primordialmente en el comportamiento de partículas suspendidas en procesos de sedimentación y compactación, dependiendo fundamentalmente de su naturaleza y concentración.

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 espesor. 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 en la carga de sólidos. Es importante determinar el área superficial mínima requerida, la profundidad del tanque y el giro de operación al que se sujetará el sistema.

### **5.1.2 Estabilización**

a) Digestión anaerobia. Consiste fundamentalmente en la degradación del material orgánico en ausencia de oxígeno molecular. Se aplica a lodos primarios, biológicos, químicos o mezcla de ellos, de preferencia espesados previamente.

Algunas ventajas de la digestión anaerobia son: la reducción de la masa total, debido a que durante el proceso se transforman en gases entre 25 y 45% de los sólidos del lodo crudo; la producción de metano que, en la mayoría de los casos, genera energía en cantidades superiores a la requerida para el mezclado y el calentamiento; el proceso destruye la mayor cantidad de organismos patógenos en el lodo; el lodo contiene nutrientes y materia orgánica que permiten su disposición final como mejorador de suelos, etc.. Sin embargo, es un proceso muy sensible a variaciones (pH, temperatura, caudal, sustrato, influencia de agentes inhibidores y tóxicos, etc.) que involucra altos costos capitales.

Algunos parámetros importantes para el diseño del proceso son: carga orgánica, tiempo de retención celular, requerimientos de calor y mezclado, producción y utilización del gas, etc..

---

b) Digestión aerobia. La digestión aerobia consiste en la degradación de residuos biológicos en presencia de oxígeno, permitiendo el suficiente tiempo de contacto entre los organismos aerobios y la materia orgánica biodegradable. A diferencia del proceso de lodos activados, 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 relaciones de supervivencia. Su operación es relativamente sencilla, sobre todo comparada con la de sistemas anaerobios; no genera malos olores, forma un producto final biológicamente estable, etc.

Algunas consideraciones importantes para el diseño del proceso son: temperatura de operación de transferencia de oxígeno, requerimientos de mezclado, tiempo de retención celular, método de operación, etc..

Cuando se trata mezclas de lodos primarios y biológicos es importante considerar que los primeros, aunque de naturaleza primordialmente orgánica contiene 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 es necesario proporcionar mayores tiempos de retención celular.

c) Estabilización con cal. Consiste esencialmente en aplicar al lodo dosis suficientes de cal para elevar el pH en el residuo, durante el tiempo de contacto necesario para crear un medio fuertemente alcalino, desfavorable para la actividad biológica de los microorganismos.

Su aplicación hace que el lodo estabilizado presente condiciones favorables para su disposición en tierra, ya sea en relleno sanitario o en suelos forestales o de cultivo. Este método se recomienda ampliamente cuando se trata de: plantas pequeñas asociadas a una baja producción de lodos, plantas que planean almacenar el lodo antes de enviarlo a otras instalaciones para su tratamiento y/o disposición posterior, plantas que utilizan otros sistemas de estabilización y requieren un método alternativo provisional, etc..

Para asegurar una buena eficiencia es importante proporcionar la dosis de cal adecuada y un mezclado suficiente. Las principales operaciones asociadas a este método de estabilización 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.

### **5.1.3 Acondicionamiento para la deshidratación**

El acondicionamiento químico se puede lograr aplicando al lodo compuestos orgánicos o inorgánicos, dependiendo del método de deshidratación que será empleado.



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 hierro o aluminio, que 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, de manera que puedan ser rápidamente deshidratados.

El acondicionamiento mediante la aplicación de compuestos orgánicos de cadenas largas y altos pesos moleculares, llamados polielectrolitos, ha hecho posible la deshidratación en filtros banda (Cornier, 1983). Estos compuestos tienen grupos cargados positiva o negativamente a lo largo de sus cadenas, de manera que son capaces de desorber al agua de la superficie de las partículas sólidas en el lodo.

#### **5.1.4 Deshidratación**

Cuando el lodo debe ser transportado grandes distancias para su disposición final, es recomendable eliminar la mayor cantidad de líquido para minimizar el volumen por disponer, así como facilitar su manejo y transporte. El sistema de deshidratación adecuado es función del caudal de lodo, de los recursos económicos, del espacio y personal disponibles, etc..

Normalmente se prefiere elegir como primera opción los sistemas mecánicos por su alta eficiencia, porque su operación es relativamente sencilla, por su flexibilidad, por la rapidez de operación y, aunque representa una inversión inicial alta, resulta suficientemente a largo plazo por que es un método mucho más rápido que los lechos de secado y requiere menos personal para su operación.

Con base en su eficiencia y sencillez se recomiendan los filtros prensa y los filtros banda para llevar a cabo la deshidratación mecánica, considerando que los primeros se prefieren para caudales menores, principalmente por su operación intermitente, y los segundos para caudales de lodos mayores, debido a que aún no se fabrican en el país.

Por otra parte, la deshidratación en lechos de secado 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 a insectos, etc.. Sin embargo, esta alternativa no debe descartarse ya que puede representar una solución adecuada en plantas pequeñas, siempre y cuando se cuente con espacio necesario.

---

### **5.1.5 Recursos económicos**

Por otro lado la falta de recursos económicos municipales y federales destinados a proyectos y programas de saneamiento ambiental incrementa la problemática de la gestión de lodos. En el caso de los municipios la mayor parte de su partida financiera se destinan a proyectos y actividades que considera más prioritarias (seguridad, bacheo, limpia entre otras). Esta problemática se ve influenciada por la política nacional y por grupos de industriales que ven al desarrollo de tecnología como una competencia, ya que siguen pensando que los gastos en programas de saneamiento ambiental son más bien gastos más que una inversión.

La situación actual, sin embargo es que muchos municipios están considerando como una necesidad impostergable la construcción de plantas de tratamiento de agua residual, muchas otras ya tienen pero no operan eficientemente o bien se encuentran fuera de operación debido a varios factores como la falta de recursos económicos y conciencia ambientalista entre otros.

Por último la reorientación del diseño y construcción de las plantas de tratamiento hoy en día en la cual se contempla un tren de tratamiento de lodos como parte integral de la misma, hace que los costos de construcción y operación se lleguen a incrementar hasta en un 50%. Por otro lado es necesario incrementar las partidas económicas destinadas a la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales y de los lodos; así como programas y políticas para su aprovechamiento.

### **5.1.6 Propuesta de tratamiento**

Antes de proponer cualquier tren de tratamiento de lodos, primero se deben tomar en consideración las ventajas y desventajas que traen consigo cada método de tratamiento, a continuación se presentan en las tablas 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 comparaciones de algunos de los métodos mencionados en el capítulo 3.

Para proponer una secuencia de tratamiento ideal, integrada por algunos de los sistemas propuestos y susceptible a ser modificada de acuerdo con las necesidades de cada caso, es necesario evaluar las características generales de los lodos que se generan en el país, los probables métodos de disposición final y demás factores externos mencionados.

TABLA 5.1 COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE ESPESAMIENTO

MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
ESPESAMIENTO POR GRAVEDAD	<p>Sencillez en el mantenimiento y operación del equipo.</p> <p>Muy efectivo para espesar lodo primario (5 a 10% de concentración de sólidos).</p> <p>Bajo consumo de energía.</p> <p>Capacidad de almacenamiento.</p> <p>No requiere acondicionamiento químico.</p>	<p>Se requiere control de olor.</p> <p>Espesamiento de lodo secundario es limitado de función esporádica.</p> <p>El lodo secundario tiene tendencia a estratificar.</p>
FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO	<p>El método más efectivo para lodo secundario (3.5 a 5%).</p> <p>Puede ser operado sin acondicionamiento químico.</p>	<p>Se requiere control de olor.</p> <p>Mayor consumo de energía.</p> <p>Requiere de mayores espacios.</p> <p>Ambiente corrosivo al ubicarse en lugares cerrados.</p>
CENTRIFUGACION	<p>Muy efectiva para lodo secundario (4 a 6%).</p> <p>Poco requerimiento de espacio.</p> <p>El proceso minimiza el olor.</p> <p>Generalmente no requiere acondicionamiento químico.</p> <p>Mayor flexibilidad para condiciones de carga pico.</p>	<p>Costos muy altos y sustanciales de inversión.</p> <p>Alto consumo de energía.</p> <p>El más adecuado para operación continua.</p> <p>Mantenimiento y operación más calificado.</p> <p>Ambiente corrosivo al ubicarse en lugares cerrados.</p>
ESPESADORES POR BANDA DE GRAVEDAD	<p>Efectivo para lodo secundario (3 a 8%).</p> <p>Poco requerimiento de espacio.</p> <p>Bajo costo de inversión.</p> <p>Bajo consumo de energía.</p> <p>Proceso controlable para condiciones de carga pico.</p>	<p>Generalmente se requiere de control de olor.</p> <p>Ambiente corrosivo al ubicarse en lugares cerrados.</p> <p>Requiere moderada supervisión y mantenimiento.</p>

FUENTE: DGCOH, 1993

TABLA 6.2 COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN

MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
DIGESTIÓN ANAEROBIA	<p>El método más común para estabilización.</p> <p>Produce energía de exceso como metano para su reutilización, reduciendo los costos de energía.</p> <p>Incremento de la tasa de estabilización del lodo.</p> <p>Mayor reducción del lodo del 30 al 50%.</p> <p>Lodo apropiado para uso agrícola.</p>	<p>Medio altamente corrosivo para tuberías y accesorios.</p> <p>Genera olores desagradables debido a la naturaleza del proceso.</p> <p>Altos costos de inversión.</p> <p>Requiere operación altamente calificada.</p> <p>Proceso biológico lento.</p> <p>Riesgo por manejo del gas metano.</p> <p>Sobrenadante con alto contenido de DQO, DBO, SS, fósforo y amoníaco.</p>
DIGESTIÓN AEROBIA	<p>Producto final estable biológicamente.</p> <p>Lodo menos oloroso.</p> <p>Bajo costo de inversión.</p> <p>De fácil operación.</p> <p>Sobrenadante con menores concentraciones de contaminantes que los del proceso anaerobio.</p>	<p>Alto consumo de energía para suministro de oxígeno.</p> <p>Proceso sensible a las temperaturas extremas.</p> <p>Menor destrucción de SSV que la digestión anaerobia.</p> <p>El lodo digerido es más difícil de deshidratar.</p> <p>No recupera gas producido.</p> <p>Mayor permanencia de organismos patógenos.</p>
FUENTE: DGCOH, 1993		

TABLA 5.3 MÉTODO DE DESHIDRATACIÓN

MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
FILTROS PRENSA DE BANDA	<p>Bajo consumo de energía.</p> <p>Bajos costos de operación y mantenimiento.</p> <p>Operación y mantenimiento sencillo.</p> <p>Buena concentración de la torta del lodo.</p>	<p>Funcionamiento limitado hidráulicamente.</p> <p>Requiere lodo uniforme en la alimentación.</p> <p>Vida media corta.</p> <p>Operación automática aplicable.</p> <p>Sensible a las características del lodo.</p>
FUENTE: DGCOH, 1993		

TABLA 5.4 COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE DISPOSICIÓN

MÉTODO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
RELLENO SANITARIO	<p>Cubriéndolos diariamente minimiza los olores.</p> <p>Menor costo que la incineración</p> <p>Es el método menos complejo de disposición.</p>	<p>Requiere de áreas adecuadas y disponible para su ubicación.</p> <p>Incremento de restricciones para su disposición.</p> <p>Requiere deshidratación para su manejo.</p>
APLICACIÓN EN SUELO	<p>Puede hacerse con o sin deshidratación.</p> <p>Producen nutrientes benéficos al suelo.</p> <p>Aplicación relativamente simple.</p>	<p>Debe identificarse el sitio de aplicación disponible.</p> <p>Se puede requerir reducción adicional de patógenos.</p>
FUENTE: DGCOH, 1993		

En México, prácticamente todos los sistemas para tratamientos de aguas residuales operan mediante sistemas de lodos activados en sus diferentes modalidades (SEDUE, 1989). En cuanto a disposición final, es evidente que el país cuenta con pocos rellenos sanitarios operando correctamente y, aunque ésta es una buena alternativa para la disposición de residuos, es más conveniente pensar en su reutilización, 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.

Tomando en cuenta estos antecedentes generales, a continuación se plantea una secuencia típica para el tratamiento de los lodos generados en plantas para tratamiento de aguas residuales de origen predominantemente doméstico que operan mediante el sistema lodos activados convencionales.

Se recomienda iniciar el tratamiento con espesamiento por gravedad de la mezcla de los lodos primarios y biológicos, o exclusivamente 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 su deshidratación en filtros prensa. La figura 5.2 presenta un diagrama de bloques que ilustra esta propuesta.

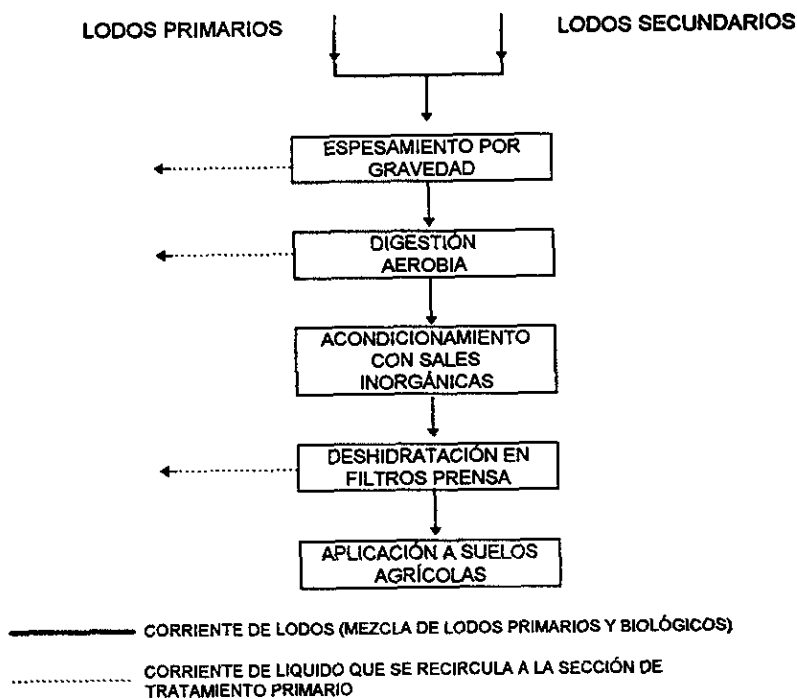


FIG. 5.2 PROPUESTA DE TRATAMIENTO PARA LODOS BIOLÓGICOS.

## 5.2 PROPUESTA DE DISPOSICIÓN

Una vez que los lodos han sido tratados, están listos para su disposición final. El método elegido determina en gran medida el tipo de tratamiento previo que requieren los lodos. En este caso se proponen dos métodos prácticos de

disposición en tierra: relleno sanitario y utilización como mejorador de suelos principalmente agrícolas. En ambos casos es necesario que el lodo se estabilice previamente para evitar riesgos de contaminación de acuíferos superficiales y subterráneos.

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. Además de la estabilización, es recomendable deshidratar los lodos para minimizar el agua libre que pueda filtrarse.

2) Uso como mejorador de suelos. Es una de las alternativas más atractivas para la disposición final de lodos biológicos tratados, ya que contiene algunos macronutrientes importantes, principalmente nitrógeno y fósforo y, en la mayoría de los casos, cantidades importantes de molibdeno y zinc (EPA, 1983). 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 del lodo.

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.

## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES.

No puede considerarse concluido el proceso de tratamiento de aguas residuales, sin prever el tratamiento adecuado de los lodos resultantes.

Un tren para tratamiento de lodos debe incluir procesos para reducir el contenido de líquido, material orgánico y la cantidad y/o actividad de microorganismos patógenos.

Los sistemas para tratamiento de lodos en México, deben adaptarse a las necesidades y posibilidades del país, de manera que resuelvan el problema de forma sencilla, económica y lo más rápida y eficientemente posible.

Los métodos propuestos para reducir el contenido de agua son: espesamiento por gravedad, deshidratación en lechos de secado y deshidratación mecánica mediante filtros prensa o filtros banda. El espesamiento por gravedad es recomendable prácticamente en todos los casos como primera etapa de tratamiento principalmente porque reduce de manera significativa el volumen de lodo por manejar. En la mayoría de los casos es también conveniente deshidratar el lodo, generalmente después de su estabilización, para minimizar el volumen de lodo por disponer y facilitar su manejo y transporte; generalmente, se recomiendan los sistemas mecánicos como primera opción para la deshidratación.

Siempre que se lleve a cabo deshidratación de lodos es importante planear también su acondicionamiento para facilitar el proceso. Cuando se lleva a cabo acondicionamiento químico es importante elegir el o los agentes químicos apropiados de acuerdo con el método de deshidratación, y la dosis correcta de acuerdo con la cantidad y características del lodo.

Los métodos propuestos para la estabilización de los lodos son: digestión aerobia, digestión anaerobia y estabilización con cal. La estabilización con cal se recomienda por sus bajos costos y su simplicidad de operación; en este proceso es importante proporcionar la dosis adecuada, y un mezclado y tiempo de contacto suficientes. La digestión aerobia es otra buena alternativa para estabilización de lodos que se recomienda principalmente cuando se trata de caudales mayores y se cuenta con los recursos técnicos y económicos suficientes. La digestión anaerobia proporciona 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.



La disposición final del lodo tratado constituye un factor determinante en la selección del tren de tratamiento apropiado. La disposición final más adecuada a implementar, es el uso de rellenos sanitarios y/o aplicación al suelo, ya que la incineración agravaría aun más el problema de contaminación en la Ciudad de México.

Dependiendo del caso específico se pueden hacer diferentes combinaciones de los diferentes sistemas y procedimientos propuestos para integrar un tren de tratamiento apropiado. Para seleccionarlos es necesario evaluar las características y caudal del lodo. Así como factores externos que influyen en el proceso, tales como limitaciones económicas, instalaciones existentes, condiciones ambientales, etc..

Cuando la planta cuenta con sistemas de tratamiento primario y secundario es conveniente mezclar los lodos obtenidos de ambas secciones para facilitar el tratamiento.

Si se trata de una planta en fase de diseño y/o no se cuenta con el lodo para determinar sus características específicas, es posible extrapolar datos de instalaciones similares para una primera aproximación de diseño.

Basados en los objetivos de operación flexible y sencilla, y mínimo costo de operación y mantenimiento a largo plazo, los procesos recomendados los procesos recomendados para el tratamiento de los lodos en la planta son los siguientes:

- Espesamiento por gravedad de lodos primarios y secundarios.
- Digestión anaerobia.
- Deshidratación en filtros prensa de banda.
- Aplicación de uso del suelo del lodo o relleno sanitario para disposición final.

**BIBLIOGRAFIA**

1. Babbitt, H. E., "Alcantarillado y Tratamiento de aguas negras", ed. Continental.
2. Borchardt & Graham W., "Control de Calidad y Tratamiento del Agua", ed. Labor. México.
3. CNA (1997), "Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales ", junio/97, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua. México.
4. Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales (XI), noviembre/97, tomo II, Zacatecas, Zac., México.
5. Culp, R.L., Wesner, G. Y Culp, G., (1978), "Handbook of Advanced Wastewater Treatment", 2ª ed. Van Nostrand Reinhold, EUA.
6. Cheremisinoff, N.P. (1993), "Water Management and Supply", water and wastewater treatment guidebooks, de. PTR, Prentice-Hall, Inc. EUA.
7. DGCOH, DDF (1989), "Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Cerro de la Estrella", folleto informativo, México.
8. DGCOH, DDF (1992), proyecto "Desarrollo de Proyectos de Ingeniería Estructural en Plantas de Tratamiento y Reuso de Aguas Residuales", consulta en sitio, México.
9. DGCOH, DDF (1993), proyecto "Manejo y Disposición de Lodos Generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Cerro de la Estrella", Vol. 1, consulta en sitio, México.
10. DGCOH, DDF (1997), "Manual de Operación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Cerro de la Estrella", consulta en sitio, México.
11. Diario Oficial de la Federación, Secretaria de Desarrollo Social, (1993), "Norma Oficial Mexicana, NOM-CRP-001-ECOL/93, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente", 22 de octubre de 1993, pp tercera sección 2-42, México.
12. Diario Oficial de la Federación, N.O.M. (1994), NOM-ECOL-052/94, 22 de octubre de 1993, " Listado de los residuos peligrosos", México.

13. Diario Oficial de la Federación, LGEEPA, "Reglamento en materia de Residuos Peligrosos", cap.1, art. 6º, 13 de diciembre de 1993, México.
14. Diaz A. N. Y González, M. S., (1992), "Propuesta de un Procedimiento para el Tratamiento de Lodos Biológicos", Memoria VIII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, SMISA, A.C., Cocoyoc Morelos, México.
15. División de Educación Continua, F.I. UNAM, (1994); Curso "Tratamiento, Manejo y Disposición de Lodos", Módulo V, (Procesos de tratamiento de aguas residuales), México.
16. EPA (Environmental Protection Agency); (1993), "Process Design Manual for Land, Applications of Municipal Sludge", de. US., Technology Transfer, EPS-625/1-83.016, EUA.
17. EPA (Environmental Protection Agency); (1979), "Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal", de. US., EPS-625/1-79-011, EUA.
18. Fair, (1993), "Purificación de Aguas y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales ", de. Limusa Noriega, México.
19. Gardea, V. H., (1985); "Hidráulica de Canales".- Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
20. Metcalf & Eddy, (1991), "Wastewater Engineering", Treatment, Disposal and Reuse; Third Edition, de. McGraw Hill, Inc. EUA.
21. López, R. R., (1996), "Apuntes de Tratamiento de Aguas Residuales", Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
22. Ramalho, R. S., (1991), "Introduction to Wastewater Treatment Processes", 2a. ed., Academic press inc., N.Y., EUA.
23. Tebutt, (1998), "Fundamentos de Control de la Calidad del Agua", ed., Limusa Noriega, México.
24. Winkler, M. A., (1986), "Tratamiento Biológico de las Aguas de Desecho", ed., Limusa.