

01177  
15

---

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA  
CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA AMBIENTAL  
(CAMPO DISCIPLINARIO: CALIDAD DEL AGUA)

**"ANÁLISIS COMPARATIVO DEL ARRANQUE DE LOS PROCESOS AEROBIO Y  
ANAEROBIO PARA LA ESTABILIZACIÓN DE LODOS DE UNA PTAR DE LA  
INDUSTRIA TEXTIL"**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA  
(AMBIENTAL)

PRESENTA:  
I. Q. NORMA ANGÉLICA OROPEZA GARCÍA

DIRIGIDA POR: M. EN I. ANA ELISA SILVA MARTÍNEZ

297627

CIUDAD UNIVERSITARIA

OCTUBRE 2001

---



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

# AGRADECIMIENTOS

***A mis padres: Angela y Rodolfo***

Por su amor y su confianza

***A mis hermanas: Adriana, Amanda y Aurora***

Por su comprensión y apoyo incondicional

***A Ricardo E.***

Por la amistad, el compañerismo, el apoyo, la paciencia, comprensión, y sobre todo por el amor con el que llenas mi vida

**Índice**

Índice de tablas.....	i
Índice de figuras.....	ii

**CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN**

1.1 La industria textil.....	1
1.2 Objetivos.....	6
1.3 Alcances.....	6
1.4 Limitaciones.....	7
1.5 Descripción general de las actividades.....	7

**CAPITULO 2. GENERALIDADES DE LA INDUSTRIA TEXTIL**

2.1 La industria textil en México.....	11
2.2 Proceso productivo.....	12
2.2.1 Clasificación de fibras textiles.....	13
2.2.2 Caracterización de los efluentes textiles.....	13
2.2.2.1 Descargas del rubro algodónero.....	19
2.2.2.2 Descargas del rubro lanero.....	21
2.2.2.3 Potencial tóxico de los productos químicos auxiliares.....	24
2.3 Residuos en la industria textil en México.....	26
2.3.1 Reutilización de los residuos generados en la industria textil.....	29
2.3.2 Disposición de los residuos generados por la industria textil.....	30

**CAPITULO 3. MANEJO Y ESTABILIZACIÓN DE LODOS**

3.1 Manejo de lodos.....	33
3.1.1 Lodos residuales en diferentes países.....	33
3.1.2 Lodos residuales en México.....	35
3.2 Manejo ambientalmente adecuado de lodos.....	36
3.2.1 Prevención de generación de lodos.....	38
3.2.2 Métodos generales utilizados para caracterización de lodo.....	39
3.2.3 Reciclaje y reuso de lodos.....	39
3.2.4 Disposición final de lodos.....	40
3.3 Tratamiento de agua residual en la industria textil.....	40
3.4 Tratamiento de lodos residuales.....	45
3.4.1 Clasificación de lodos.....	47
3.4.2 Espesamiento de lodos.....	50
3.4.3 Estabilización de lodos.....	51
3.4.3.1 Estabilización aerobia de lodos.....	51
3.4.3.2 Estabilización anaerobia de lodos.....	53
3.4.3.3 Comparación de las características de los procesos aerobio y anaerobio.....	56
3.4.3.4 Otros métodos de digestión.....	56
3.4.4 Acondicionamiento de lodos.....	58
3.4.5 Secado e incineración de lodos.....	59
3.5 Tendencias en el tratamiento de lodos.....	59

**CAPITULO 4. METODOLOGÍA**

4.1 Origen de los lodos.....	61
4.2 Muestreo.....	65
4.3 Técnicas de caracterización y evaluación.....	66
4.4 Características y arranque de los reactores.....	66
4.4.1 Características del reactor aerobio.....	67
4.4.2 Arranque del reactor aerobio.....	68
4.4.3 Características del reactor anaerobio.....	69
4.4.4 Arranque del reactor anaerobio.....	70
4.5 Comparación de las variables de operación.....	70

**CAPITULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

5.1 Caracterización de lodos residuales.....	72
5.2 Arranque del reactor aerobio.....	75
5.3 Arranque del reactor anaerobio.....	77
5.4 Características de los lodos de efluente.....	78
5.4.1 Resultados obtenidos en el reactor aerobio.....	78
5.4.2 Resultados obtenidos en el reactor anaerobio.....	79

**CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

6.1 Conclusiones.....	83
6.2 Recomendaciones.....	84
Bibliografía.....	85
ANEXO I.....	91

**Índice de tablas**

Tabla 1.1 Consumo de agua en la industria textil.....	2
Tabla 2.1 Número de establecimientos del giro textil en México.....	12
Tabla 2.2 Empleos generados por la industria textil.....	12
Tabla 2.3 Características de las descargas de industrias aldoneras.....	19
Tabla 2.4. Características de las descargas de industrias laneras.....	24
Tabla 2.5. Características de los efluentes líquidos textiles según el tipo de proceso y fibra.....	24
Tabla 2.6 Productos químicos y auxiliares empleados.....	24
Tabla 2.7 Colorantes considerados como tóxicos por la asociación ecológica y toxicológica de las industrias manufactureras de colorantes.....	25
Tabla 2.8 Características que hacen a un residuo peligroso.....	27
Tabla 2.9 Residuos reportados con mayor frecuencia en la industria textil.....	28
Tabla 2.10 Manejo de los residuos sólidos generados en el giro textil.....	28
Tabla 2.11 Residuos enviados a tiradero.....	31
Tabla 3.1 Manejo de lodos en algunos países.....	34
Tabla 3.2 Criterios microbiológicos para biosólidos Clase A.....	37
Tabla 3.3 Criterios microbiológicos para biosólidos Clase B.....	38
Tabla 3.4 Degradación de colorantes azo.....	43
Tabla 3.5 Clasificación de lodos por su origen.....	48
Tabla 3.6 Tipo de lodo y prioridad de manejo.....	49
Tabla 3.7 Clasificación de lodos en función de diferentes parámetros.....	50
Tabla 3.8 Métodos de espesamiento de lodos.....	51
Tabla 3.9 Parámetros determinantes en la digestión aerobia de lodos.....	52
Tabla 3.10 Parámetros determinantes en la digestión anaerobia de lodos.....	54
Tabla 3.11 Características de la digestión aerobia y anaerobia de lodos.....	56
Tabla 3.12 Métodos de acondicionamiento de lodos.....	58
Tabla 3.13 Nuevas tecnologías en el tratamiento de lodos.....	60
Tabla 4.1 Parámetros de caracterización y evaluación de lodos.....	66
Tabla 4.2 Comparación de las variables de operación.....	71
Tabla 5.1 Características de pH, temperatura y $\rho$ .....	73

Tabla 5.2 Características de SST, SVT y SFT en el influente.....	74
Tabla 5.3 Características de DBO <sub>5</sub> en el influente.....	75
Tabla 5.4 Características de DQO en el influente .....	75
Tabla 5.5 Resultados de STT, SVT y SFT en el licor de mezclado (aerobio).....	76
Tabla 5.6 Resultados de STT, SVT y SFT en el licor de mezclado(anaerobio).....	77
Tabla 5.7 Resultados de DBO <sub>5</sub> en lodos estabilizados en el reactor aerobio .....	81
Tabla 5.8 Resultados de DQO en lodos estabilizados en el reactor aerobio .....	81
Tabla 5.9 Resultados de DBO <sub>5</sub> en lodos estabilizados en el reactor anaerobio .....	81
Tabla 5.10 Resultados de DQO en lodos estabilizados en el reactor anaerobio .....	81
Tabla 5.11 Ventajas y desventajas encontradas en la estabilización aerobia y anaerobia.....	82

### **Índice de Figuras**

Figura 1.1 Rutas ambientales de los colorantes .....	4
Figura.1.2 Alternativas planteadas en el tratamiento y disposición de lodos .....	5
Figura 1.3 Diagrama de flujo de actividades realizadas .....	10
Figura 2.1 Proceso productivo del algodón .....	20
Figura 2.2 Esquema del proceso productivo de la lana.....	23
Figura 2.3 Generación de lodos en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil.....	29
Figura 3.1 Líneas más usuales en el tratamiento de lodos.....	46
Figura 4.1 Generación de lodos en la PTAR de la industria textil .....	62
Figura 4.2 Sistema de lodos activados de la PTAR de la industria textil .....	64
Figura 4.3 Cárcamo de lodos de la PTAR de la industria textil .....	65
Figura 4.4 Celda Eckenfelder empleada en el tratamiento aerobio .....	67
Figura 4.5 Reactor tipo huevo empleado en el tratamiento anaerobio .....	69
Figura 4.6 Celda Eckenfelder utilizada en la digestión aerobia de lodos .....	71
Figura 4.7 Reactor tipo huevo utilizado en la digestión anaerobia de lodos .....	71
Figura 5.1 Relación de SVT/STT en el influente.....	74
Figura 5.2 Relación de SVT/STT en el reactor aerobio.....	76
Figura 5.3 Relación de SVT/STT del reactor anaerobio.....	77
Figura 5.4 Comparación de los resultados de DBO <sub>5</sub> en el efluente.....	80
Figura 5.5 Comparación de los resultados de DQO en el efluente.....	80

Tabla 5.2 Características de SST, SVT y SFT en el influente.....	74
Tabla 5.3 Características de DBO <sub>5</sub> en el influente.....	75
Tabla 5.4 Características de DQO en el influente .....	75
Tabla 5.5 Resultados de STT, SVT y SFT en el licor de mezclado (aerobio).....	76
Tabla 5.6 Resultados de STT, SVT y SFT en el licor de mezclado(anaerobio).....	77
Tabla 5.7 Resultados de DBO <sub>5</sub> en lodos estabilizados en el reactor aerobio .....	81
Tabla 5.8 Resultados de DQO en lodos estabilizados en el reactor aerobio .....	81
Tabla 5.9 Resultados de DBO <sub>5</sub> en lodos estabilizados en el reactor anaerobio .....	81
Tabla 5.10 Resultados de DQO en lodos estabilizados en el reactor anaerobio .....	81
Tabla 5.11 Ventajas y desventajas encontradas en la estabilización aerobia y anaerobia.....	82

**Índice de Figuras**

Figura 1.1 Rutas ambientales de los colorantes .....	4
Figura. 1.2 Alternativas planteadas en el tratamiento y disposición de lodos .....	5
Figura 1.3 Diagrama de flujo de actividades realizadas .....	10
Figura 2.1 Proceso productivo del algodón .....	20
Figura 2.2 Esquema del proceso productivo de la lana.....	23
Figura 2.3 Generación de lodos en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil.....	29
Figura 3.1 Líneas más usuales en el tratamiento de lodos.....	46
Figura 4.1 Generación de lodos en la PTAR de la industria textil .....	62
Figura 4.2 Sistema de lodos activados de la PTAR de la industria textil .....	64
Figura 4.3 Cárcamo de lodos de la PTAR de la industria textil .....	65
Figura 4.4 Celda Eckenfelder empleada en el tratamiento aerobio .....	67
Figura 4.5 Reactor tipo huevo empleado en el tratamiento anaerobio .....	69
Figura 4.6 Celda Eckenfelder utilizada en la digestión aerobia de lodos .....	71
Figura 4.7 Reactor tipo huevo utilizado en la digestión anaerobia de lodos .....	71
Figura 5.1 Relación de SVT/STT en el influente.....	74
Figura 5.2 Relación de SVT/STT en el reactor aerobio.....	76
Figura 5.3 Relación de SVT/STT del reactor anaerobio.....	77
Figura 5.4 Comparación de los resultados de DBO <sub>5</sub> en el efluente.....	80
Figura 5.5 Comparación de los resultados de DQO en el efluente.....	80



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 La industria textil

El trabajo de investigación presentado es el resultado de la aplicación de los procesos aerobio y anaerobio durante el arranque de los procesos de estabilización de lodos generados por el tratamiento de efluentes textiles, estos lodos se encuentran en el listado de la NOM-052-ECOL-1993, considerados como residuo peligroso por sus características de toxicidad y corrosividad, aunado a esto, el giro de la industria textil es uno de los que más agua utiliza en su proceso de producción, y de acuerdo a la bibliografía es uno de los rubros más representativos en cuanto a proceso productivo en América Latina.

Actualmente las necesidades de minimización de residuos, así como la disposición adecuada y segura de los mismos, son aspectos de suma importancia a escala mundial. Por esta razón es necesario plantear alternativas en la estabilización de residuos para su posterior disposición o reuso adecuado, debe considerarse que el manejo de lodos en México es un aspecto muy descuidado y son muy pocas las plantas que cuentan con un sistema de tratamiento de lodos, además, no existe una cifra de aproximación referente a la cantidad de lodos generados a nivel municipal y mucho menos por giro industrial, de acuerdo con la NOM-052-ECOL-1993 la mayor parte de lodos que se producen resultan peligrosos por su contenido de microorganismos patógenos, sin embargo los residuos derivados de la industria textil, presentan una degradación parcial de contaminantes durante el tratamiento de agua, estos contaminantes semidegradados, se concentran en los lodos residuales, y no se encuentran listados en la norma como contaminantes tóxicos. En países como Holanda, Alemania y Suiza se tiene prohibida la manufactura, importación o venta de textiles y ropa que contenga colorantes azoicos, debido a que la parcial degradación de los mismos, da lugar a la formación de aminas carcinógenicas, así, con la prohibición del uso de este tipo de compuestos se previene la generación de residuos peligrosos desde el proceso producción en la industria textil. Sin embargo en México el problema se agrava debido al desconocimiento del efecto de productos químicos utilizados en procesos productivos.

Con base en lo anterior se observó la etapa de arranque de los procesos aerobio y anaerobio de estabilización de lodos, para evaluar la remoción de materia orgánica medida como DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y DQO (Demanda Química de Oxígeno), considerando de acuerdo a la bibliografía las restricciones que por contaminantes difíciles de biodegradar pueden presentarse en ambos procesos.

El proceso de producción en la industria textil, como en las demás ramas industriales, siempre ha estado determinado por los requerimientos del mercado. En las décadas de 1950 y 1960, la llegada de las fibras de polímeros sintéticos y de nuevas gamas de colorantes, determinó su desarrollo en el campo de los procesos húmedos. En la década de los 70's la crisis petrolera alentó el desarrollo de equipos para el ahorro de agua y energía estimulando la introducción en algunos países de procesos más racionalizados.

La década de 1980 se describió como la era del consumidor y los cambios en el mercado de los textiles, convirtiéndose éstos en factores decisivos para el gran incremento en la producción. Aunado a lo anterior y debido a que en su proceso emplea una gran variedad de compuestos químicos, en la actualidad el impacto ambiental causado por la emisión de residuos de este giro industrial, principalmente líquidos (tabla 1.1), hace imperiosa la necesidad de contar con medidas alternas para solucionar los efectos adversos de esta actividad sobre el ambiente (Fernández, 1981).

**Tabla 1.1 Consumo de agua en la industria textil (Fernández, 1981)**

Proceso	L de agua por kg de producto terminado
Hilados	10 – 80
tejido de algodón	100 – 300
tejido de lana	100 – 300
género de punto	80 – 120
lavado de lana	5 – 20

Debido a los grandes volúmenes de agua utilizados en estos procesos de fabricación y a que dicha agua una vez empleada contiene una elevada cantidad de contaminantes difíciles de eliminar, es necesario dar un tratamiento a los efluentes líquidos (físicoquímico, biológico, o ambos), los cuales concentran los contaminantes en los lodos, éstos deben ser sometidos a tratamientos de estabilización que permitan disponerlos de manera adecuada, lo cual hace necesario plantear alternativas de solución que busquen el mejor tratamiento de lodos producidos por las Plantas de tratamiento de agua residual (PTAR), lo que a su vez llevará a dar una mejor disposición desde el punto de vista ambiental.

En México la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente de 1988 (LGEEPA), modificada en diciembre de 1996, define como *residuo* a cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento, cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó.

En la NOM-052-ECOL-1993, 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, se encuentran incluidos los lodos derivados del tratamiento de efluentes textiles. Los residuos considerados como peligrosos en esta norma se clasifican según el giro industrial y proceso, incluyendo la clave CRETIB (Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico, Inflamable o Biológico-infeccioso) y un número de identificación asignado por el Instituto Nacional de Ecología (INE).

Recientemente se elaboró el anteproyecto de la Norma Oficial Mexicana NOM-004-ECOL-1999 para lodos y biosólidos, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes contenidos para su aprovechamiento y disposición final.

Entre los residuos más tóxicos de la industria textil, se encuentran los colorantes empleados para la tinción y el acabado, tal es el caso de los colorantes tipo azo, ampliamente usados en la tinción textil y la industria del cuero, cuyos efectos han sido estudiados en diversos animales, resultando carcinógenos para la vejiga urinaria humana y causantes de tumores en una gran variedad de animales. En la figura 1.1 se muestran las rutas seguidas por este tipo de contaminantes en el ambiente (Motschi, 1994).

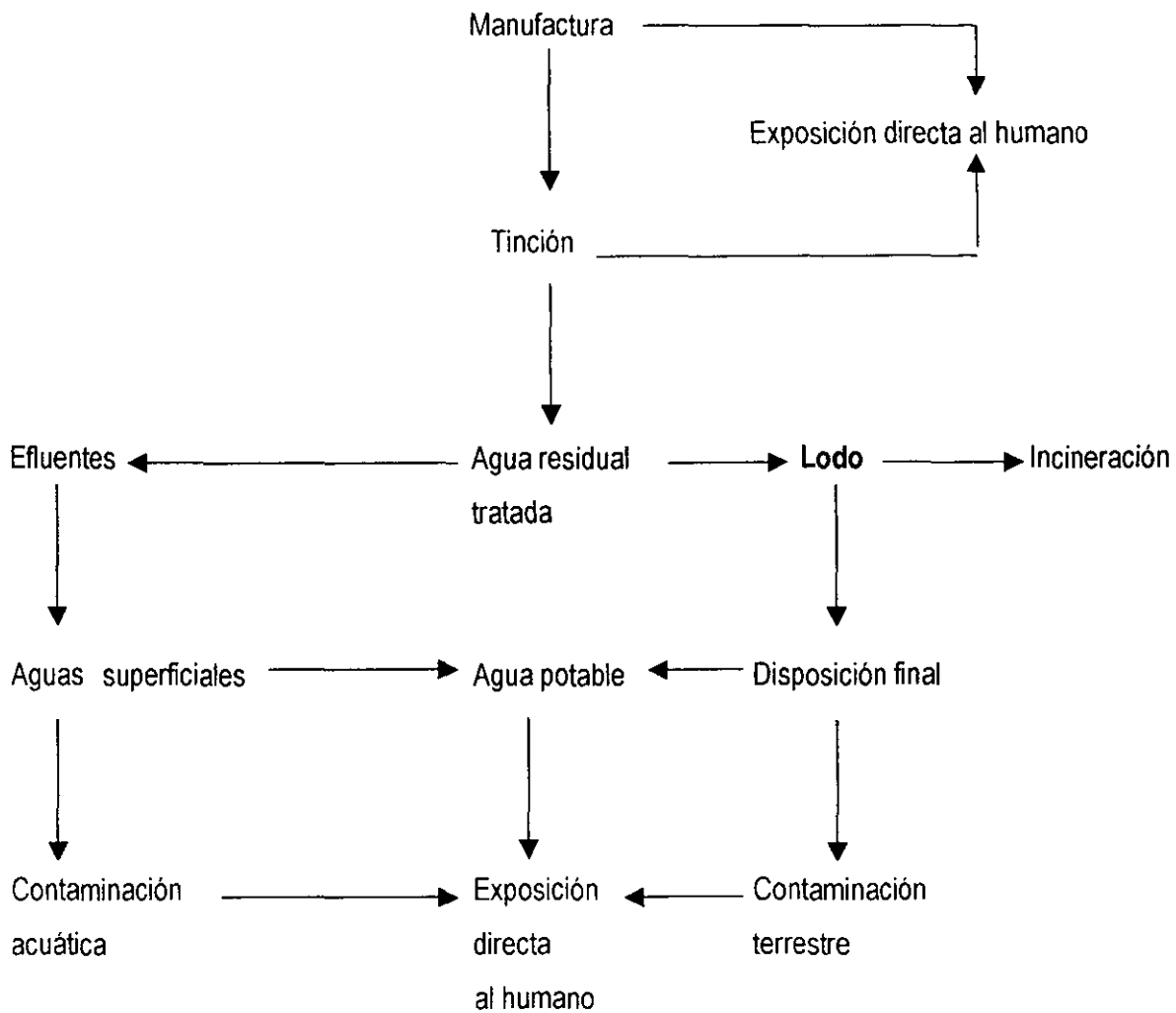


Figura 1.1 Rutas ambientales de los colorantes (Motschi, 1994)

Los colorantes contenidos en las aguas residuales, pasan a las plantas de tratamiento donde se eliminan en gran medida por absorción en el lodo producto de un tratamiento fisicoquímico o bien del tratamiento biológico, el lodo resultante de estos procesos se somete a un análisis CRETIB, con el cual se determina si el lodo es peligroso o no, lo que permite llegar a la consideración de alternativas como las que se plantean en la figura 1.2.

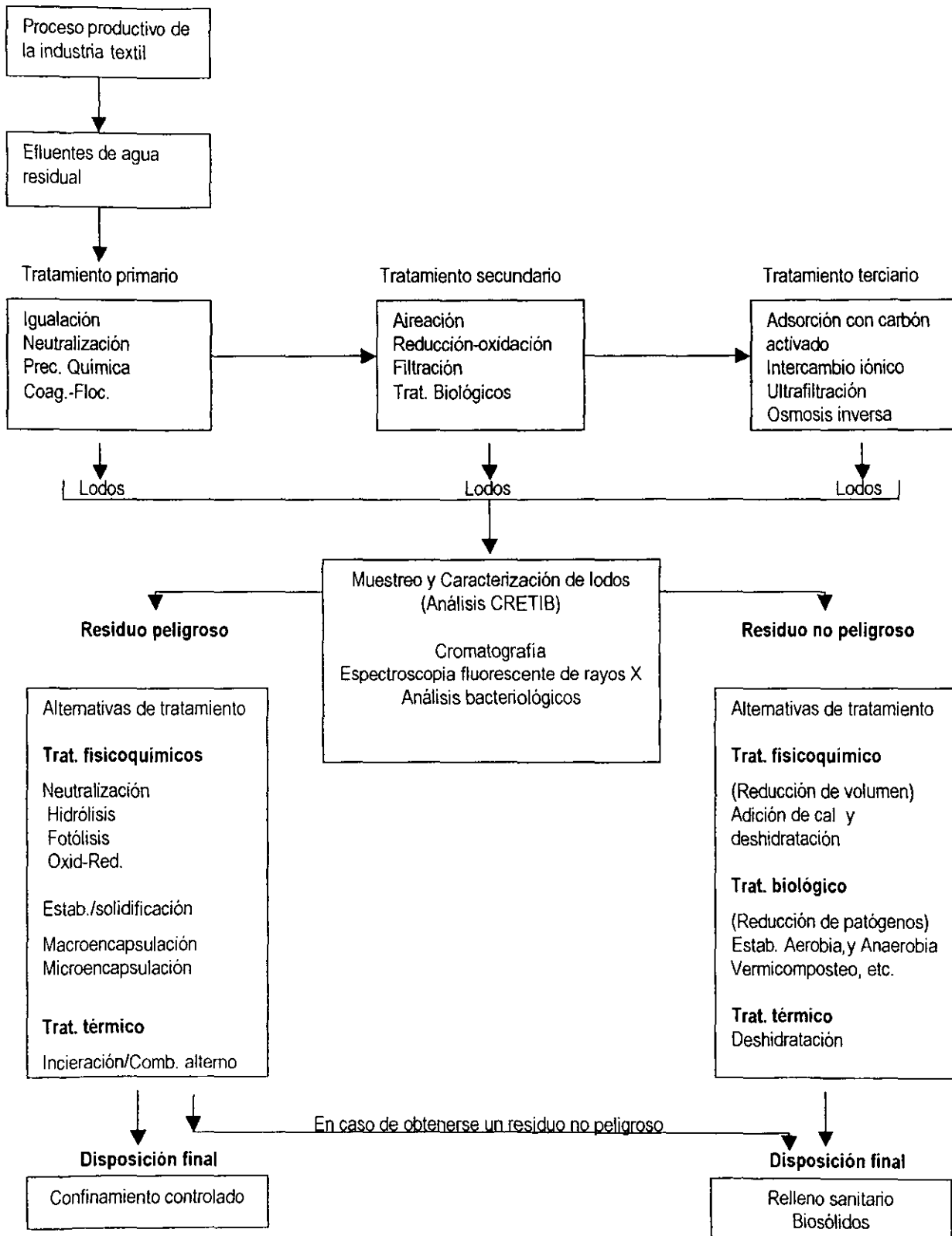


Figura. 1.2 Alternativas planteadas en el tratamiento y disposición de lodos.

## 1.2 Objetivos

### Objetivo general

Realizar un análisis comparativo de los procesos aerobio y anaerobio durante el arranque de un sistema de estabilización de lodos generados por una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la industria textil a nivel piloto, a través de la remoción de contaminantes medidos como DQO y DBO.

### Objetivos particulares

Para lograr ese objetivo fue necesario:

1. Investigar en la bibliografía los procesos de tratamiento de agua residual de la industria textil y los métodos de manejo de lodos producidos en las plantas de tratamiento.
2. Caracterizar fisicoquímicamente el lodo proporcionado por una planta de tratamiento de aguas residuales de una industria textil.
3. Analizar el arranque de los reactores aerobio y anaerobio mediante la relación de SVT/STT en el licor de mezclado.
4. Determinar la eficiencia de remoción de los reactores biológicos midiendo los parámetros de calidad (DBO<sub>5</sub> total y DQO).
5. Seleccionar la mejor alternativa de estabilización de lodos con base en los resultados obtenidos.

## 1.3 Alcances

- Se aplicó una metodología diseñada para un caso de estudio.
- Se cuantificó la remoción de contaminantes medidos como DBO<sub>5</sub> total y DQO eliminados en ambos procesos de tratamiento con las mismas condiciones de operación, durante el arranque de los reactores.
- Se usaron reactores a nivel piloto: celda Eckenfelder como reactor aerobio y un reactor anaerobio tipo huevo.

## **1.4 Limitaciones**

Las limitaciones de la investigación realizada, debido principalmente al tiempo y recursos económicos disponibles son:

- El único parámetro de evaluación fue la materia orgánica medida como DBO y DQO, no se realizaron otras mediciones de calidad o toxicidad sobre compuestos específicos.
- Los lodos residuales se proporcionaron por una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de una industria textil ubicada al sur de la Ciudad de México. Los muestreos estuvieron sujetos a las restricciones que por políticas o problemática de la empresa se presentaron.
- Las determinaciones analíticas de las muestras se llevaron a cabo en el laboratorio de la División de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería (DEPFI.)
- No se realizó la cuantificación de biogás en el sistema anaerobio.

## **1.5 Descripción general de actividades**

La parte inicial del trabajo consistió en una revisión bibliográfica para establecer la situación en México referente al tema, así como la problemática y las alternativas de solución planteadas a nivel mundial para el arranque de los sistemas de estabilización lodos.

Posteriormente se realizó el muestreo de lodos provenientes de una PTAR de la industria textil. Este muestreo se efectuó dos veces por semana durante cinco meses, estos lodos fueron extraídos del cárcamo de bombeo de lodos en donde se almacenan lodos del tratamiento primario, secundario y terciario. Los lodos muestreados se caracterizaron de acuerdo a APHA (1992), de manera simultánea se adquirió el material y equipo necesarios para el montaje, a nivel piloto, de los reactores biológicos en las instalaciones de la DEPFI de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Se montaron dos reactores con capacidad de 20 litros, uno aerobio (celda Eckenfelder) y otro anaerobio de tipo huevo completamente agitado, operados en forma semicontinua con tiempos de retención hidráulica (TRH) de 20 días, a temperatura (T) ambiente (18-20°C) y con un pH de entre 7 y 7.5, alimentándose diariamente con un litro de lodo, durante un periodo de 60 días. Las condiciones de operación (TRH, T, pH) y la eficiencia de los reactores, se establecieron a través de la caracterización periódica de los parámetros de calidad (DBO<sub>5</sub>, DQO) en los efluentes de los mismos.

Finalmente se realizó un análisis de datos experimentales para obtener la eficiencia de remoción en cada proceso durante el arranque de los sistemas, la cual permitió llegar a la elección del proceso que arroja los mejores resultados en el arranque de los sistemas estabilización de lodos derivados de la industria textil tomada como caso de estudio.

En la figura 1.3 se presenta el diagrama flujo de las actividades realizadas durante el arranque de los sistemas de estabilización de lodos (aerobio y anaerobio).

Con relación a lodos generados en el tratamiento de efluentes textiles en México, se sabe que el 30% llegan a relleno sanitario, el 0.03% a confinamiento controlado y del 69.97% restante se desconoce su destino final. En caso de que estos lodos resultaran con características de residuo no peligroso podrían ser empleados como mejoradores de suelo minimizando las cantidades enviadas a relleno sanitario, como sucede en otros países en donde los lodos municipales e industriales se clasifican como tales. En caso de que el lodo sea clasificado como residuo peligroso, su disposición podría realizarse en confinamiento controlado, o bien, enviarse a incineración.

Con lo anterior se plantea la necesidad de realizar estudios más profundos y sobre contaminantes específicos a partir del tipo de compuestos utilizados por la industria textil mexicana.

Los lodos utilizados en el caso de estudio se proporcionaron por una industria textil mexicana, estos resultaron con características no peligrosas, y de acuerdo con lo reportado por la industria se disponen en relleno sanitario, sin tratamiento de estabilización previo.

Como se muestra en los resultados, los lodos después del arranque de los reactores, presentaron una degradación de contaminantes considerable y la eliminación de olor fétido, sin embargo no fueron realizados análisis de contaminantes específicos, ni otros parámetros de evaluación por limitaciones de capital.

En los capítulos 2 y 3 se revisan de manera general los procesos textiles más utilizados en Latinoamérica (Proceso productivo de la lana y el algodón), así como el manejo de lodos actualmente. El capítulo 4 presenta un ejemplo de la aplicación de la metodología planteada, describiéndose en éste, las



características de los reactores, las condiciones de operación, los problemas que se presentaron durante la etapa de experimentación, así como las técnicas de caracterización y evaluación empleadas. El capítulo 5 muestra los resultados obtenidos y se realiza la comparación para ambos procesos, finalmente en el capítulo 6 se encuentran las conclusiones a las que permitió llegar la etapa de experimentación, así como las recomendaciones que pueden ser de utilidad para trabajos posteriores.

A continuación se mencionan de manera general los puntos importantes encontrados en la realización del trabajo:

- La aplicación de procesos de estabilización de lodos municipales e industriales, así como la disposición o reuso adecuado de los mismos es una necesidad imperiosa en México.
- La metodología aplicada al caso de estudio, permitió observar el arranque de los sistemas aerobio y anaerobio, aplicados a lodos provenientes de la industria textil, que por norma se consideran residuo peligroso.
- Es importante considerar que un residuo no peligroso, no es necesariamente un residuo estable.
- La metodología puede en un momento dado, ser aplicada a otros rubros industriales para la evaluación del comportamiento de arranque de los sistemas.
- Se concluye claramente que ambos procesos pueden ser aplicados en la estabilización de lodos generados en la industria textil, teniendo cada uno ventajas y desventajas para un caso de estudio en particular.
- Finalmente, se recomienda continuar con este tipo de estudios enfocados al seguimiento del mecanismo en la remoción de contaminantes específicos.

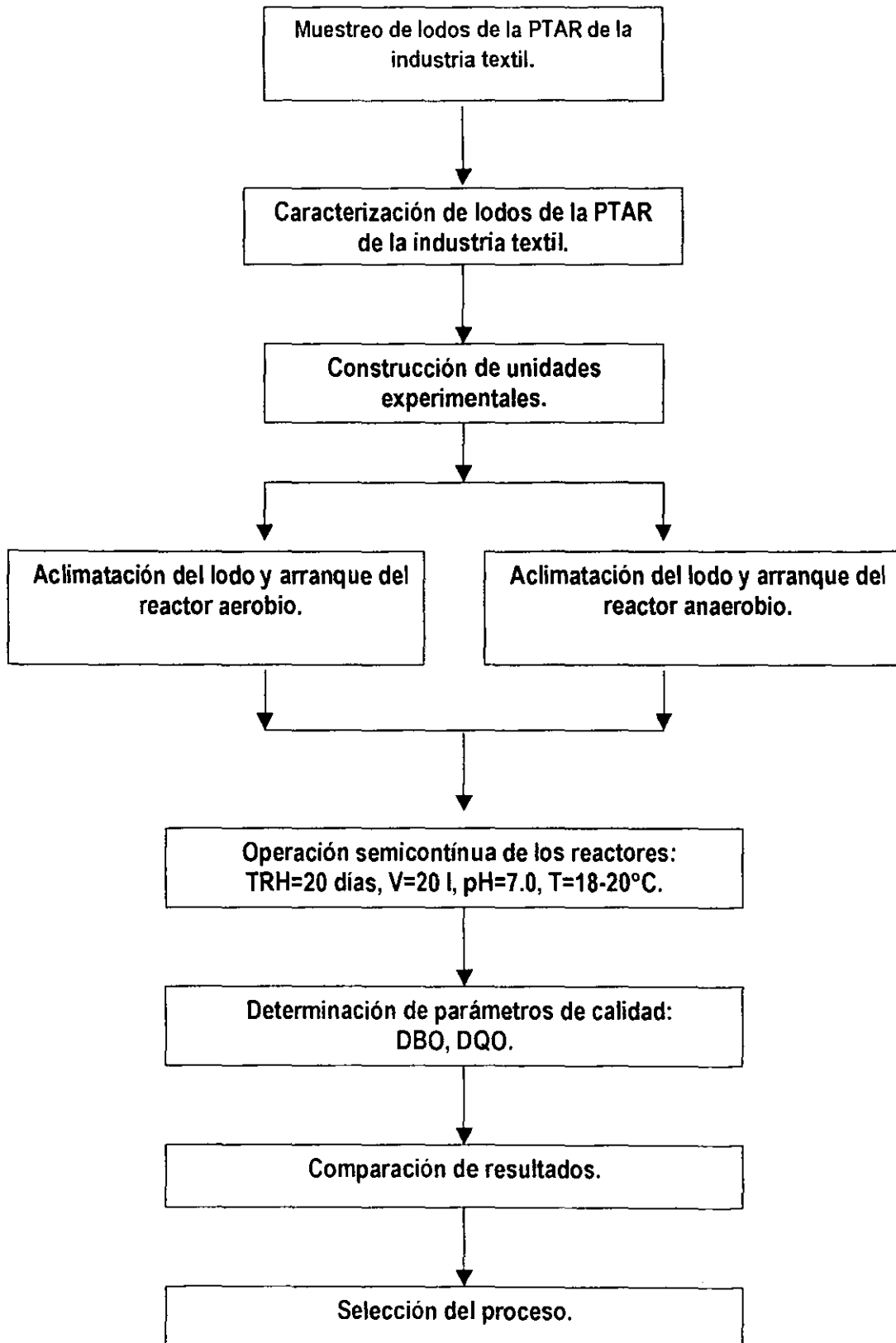


Figura 1.3 Diagrama de flujo de actividades realizadas

## **CAPÍTULO 2. GENERALIDADES DE LA INDUSTRIA TEXTIL**

Este capítulo pretende dar un panorama general de la situación de la industria textil en México, una descripción de los procesos más usados, así como de las características y el manejo de residuos generados por esta industria

### **2.1 La industria textil en México**

De acuerdo con las estadísticas obtenidas en el Censo Industrial 1993 por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI, 1993), en México el Subsector industrial 32 referente a textiles, prendas de vestir e industria del cuero se compone de 44,071 establecimientos (número total de empresas incluyendo fabricantes de ropa de piel), que representan el 2.25% de la industria manufacturera a escala nacional. Este subsector a su vez se divide en ramas de las cuales se consideran dentro del giro textil las siguientes:

- 3211: Industria textil de fibras duras y cordelería de todo tipo.
- 3212: Hilado, tejido y acabado de fibras blandas, excluye de punto.
- 3213: Confección de materiales textiles, incluye la fabricación de tapices y alfombras.
- 3214: Fabricación de tejidos de punto.
- 3220: Confección de prendas de vestir.
- 3230: Industria del cuero, pieles y sus productos.
- 3240: Industria del calzado.

Cómo se observa en la tabla 2.1, en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se encuentran instaladas 4, 982 empresas del sector textil, que representan el 14.4% de este giro a nivel nacional. (INEGI, 1993)

En México la industria textil según datos del INEGI se encuentra distribuida en las siguientes zonas (INEGI, 1999):

- Zona metropolitana de Guadalajara.
- Corredor industrial Querétaro-Leon.

- Corredor industrial Puebla-Tlaxcala.
- Zona metropolitana del Valle de México
- Corredor industrial Lerma-Toluca

**Tabla 2.1 Número de establecimientos del giro textil en México (INEGI, 1993)**

Rama	Denominación	Nacional	D.F.	Zona conurbada del Estado de México.	% ZMCM respecto al nacional.
3212	Hilado tejido y acabado de fibras blandas, excluye de punto.	5,467*	278*	183*	8.4
3213	Confección de materiales textiles, incluye la fabricación de tapices y alfombras de fibras blandas.	4,968**	315**	103**	8.4
3214	Fabricación de tejidos de punto	1,632	343	133	29.2
322	Confección de prendas de vestir.	22,560***	2,882***	745***	16.1
<b>Total</b>		<b>34,627</b>	<b>3,818</b>	<b>1,164</b>	<b>14.4</b>

\*Incluye las clases 321201, despepite y empaque de algodón; 321210, tejido de rafia sintética, 32212 y tejido de redes y paños para pescar de fibras blandas.

\*\*Incluye las clases 321331, tejido a mano de alfombras y tapetes de fibras blandas y 321232, tejido a máquina de alfombras y tapetes de fibras blandas.

\*\*\*Incluye las clases 322007, confección de prendas de vestir de cuero, piel y materiales sucedáneos para caballero; 322008, confección de prendas de vestir de cuero, piel y materiales sucedáneos para dama; 322013.

De acuerdo con las cifras de la Cámara Nacional de la Industria Textil (CANAINTEX), esta rama productiva en el país, en términos de tamaño por empresa está conformada por micro, pequeñas, medianas y grandes industrias, de las cuales en el primer semestre de 1998 existían 1,567 como microempresas, 833 pequeñas, 208 medianas y 181 grandes, y el número de empleos que proporciona esta industria va en aumento como muestra la tabla 2.2. (CANAINTEX, 1999)

**Tabla 2.2 Empleos generados por la industria textil (CANAINTEX, 1999)**

Año	1996	1997	1998
Número de empleos	133,150	161,206	172,000

## 2.2 Proceso productivo de la industria textil

El procesamiento textil a grandes rasgos comprende tres fases que son: preparación, tejido y acabado. En el rubro algodonero la transformación de la fibra cruda en tejido no acabado o en hilos, es

esencialmente una operación en seco y el proceso de acabado es el que genera más desechos líquidos. En la industria lanera, la etapa de preparación (lavado) es la que aporta la mayor carga contaminante.

### 2.2.1 Clasificación de fibras textiles

Las industrias textiles se agrupan en dos categorías según el tipo de fibras que procesan:

a) Fibras naturales

Fibras naturales: algodón, yute, lino

Fibras naturales proteicas: lana y seda natural

b) Fibras artificiales

Fibras celulósicas: viscosa y acetato

Fibras no celulósicas o sintéticas: poliéster (diolén); acrílico (dralón), poliamida (nylon, perlón); y elastómero (lycra).

En América Latina se distinguen dos grandes rubros textiles, aquellos de corte lanero y sus mezclas sintéticas, y los algodoneros y sus mezclas.

### 2.2.2 Caracterización de los efluentes textiles

#### i) Algodón y sus mezclas (Rondinel, 1990)

##### **A. Almacenamiento de la materia prima**

Las fibras llegan acondicionadas en fardos.

##### **B. Preparación de la fibra hasta el hilado o tejido (procesos secos)**

La fibra se procesa en las etapas de cardado-peinado, hilandería y ovillado.

##### **B1. Cardado-peinado**

Las balas se abren, se toman fibras en forma aleatoria de los distintos fardos, mezclándolas.

Neumáticamente se transportan a las cardas donde se paralelizan las fibras, produciéndose su limpieza y mezcla. El velo así obtenido en algunos casos es peinado sucesivas veces, según la calidad que se desee obtener. En estas operaciones secas se eliminan cascarillas, fibras cortas y demás impurezas. De las operaciones de cardado o peinado se obtiene una mecha de fibras que es enrollada.

## **B2. Hilado**

Reduce la mecha (cardada o peinada) al grado de finura conveniente, dándole la tensión y la torsión necesarias para una resistencia y finura específicas. El hilo se enrolla bajo diferentes formas, carretes o bobinas cilíndricos o cónicos que pueden ser teñidos o bien enviados al sector de tejeduría.

## **C. Teñido de hilado**

Los carretes o bobinas de hilado se someten a un tratamiento con soluciones de sosa cáustica y detergentes (descruce) en máquinas a presión, que eliminan completamente de las impurezas naturales del algodón (ceras, pectinas, etc.). Tras el enjuague en la misma máquina, las bobinas se tiñen, utilizando diferentes colorantes y auxiliares en función del color y la fibra a procesar. El hilado así teñido, va directamente al proceso de tejido. Para tejidos planos, aquel que se emplea como urdimbre debe ser engomado previamente. Para tejido de punto (jersey) esta operación no es necesaria. En el teñido se producen descargas líquidas alcalinas con una mediana carga orgánica (DQO, DBO), color y detergentes.

## **D. Engomado o encolado**

Los hilos crudos teñidos empleados como urdimbre llegan a las unidades de engomado en rollos, pasan por una solución de goma de fécula hervida (almidón) u otros agentes encolantes: carboximetilcelulosa (CMC), alcohol polivinílico (PVA) y acrilatos para darle la resistencia necesaria para el tejido subsecuente. Los desechos están constituidos por las aguas de lavado de los recipientes donde se preparan las soluciones de almidón u otros agentes de engomado y por las descargas de las engomadoras. Estos desagües, en general de bajo volumen, se caracterizan por tener una elevada carga orgánica y sólidos en suspensión.

## **E. Tejido**

Los hilos pueden tejerse en telares a lanzadera (tejido plano / trama-urdimbre) o en máquinas circulares (tejido de punto). En ambos casos no se producen descargas líquidas ya que se trata de procesos secos.

## **F. Chamuscado o quemado**

El tejido plano se somete a un proceso de flameado por medio del cual se completa la eliminación de cascarillas y pelusas, resultando un tejido de espesor uniforme. Este proceso implica un lavado final de la tela con agua fría, la que puede descargarse directamente a la red dado su bajo nivel de contaminación.

## **G. Desencolado o desengomado.**

En esta operación, previa al teñido, se remueve el agente encolante empleado para los tejidos planos.

El desengomado puede ser ácido o enzimático. Para ello pueden utilizarse enzimas ácidas, detergentes alcalinos y jabones disueltos en agua, para posteriormente enjuagar la tela.

En el desengomado ácido se utiliza ácido diluido para hidrolizar la fécula y solubilizarla.

En el desengomado enzimático se utilizan enzimas vegetales o animales para descomponer la goma en una forma soluble en agua. Los agentes de desengomado se aplican directamente sobre la tela. En el caso de desengomado ácido, las telas se remojan de 4 a 12 horas a la temperatura del ambiente. En el enzimático, de 4 a 8 horas de 55 a 82°C. Después de solubilizar la goma, la tela se enjuaga con agua.

En el caso de los agentes encolantes tales como el PVA y la CMC, al ser solubles en agua, sólo se requiere un enjuague para removerlos. Si bien el volumen de estas descargas resulta en promedio sólo el 15% del total, su aporte contaminante representa aproximadamente 50% de la carga total expresada como DBO.

#### **H. Mercerizado**

Este proceso permite incrementar la resistencia tensil, lustre y la afinidad de los colorantes sobre la fibra de algodón y fibras sintéticas celulósicas. Consiste en impregnar la tela o el hilado con una solución fría de hidróxido de sodio (15 a 30% en volumen). Este procedimiento se realiza manteniendo estirado el hilado o tejido bajo tensión. En algunos casos se elimina posteriormente el álcali con ayuda de algún ácido débil y se enjuaga con agua y vapor, provocándose la consecuente descarga. En otros, el exceso de sosa en la tela o el hilado se aprovecha para el siguiente paso de descruce. Por otra parte, el primer enjuague de este proceso no acidulado puede concentrarse y recuperarse para su reuso en el mercerizado.

#### **I. Descruce**

Remueve impurezas naturales adheridas a las fibras y a la tela para acondicionarla para las posteriores etapas de blanqueo o tinte. Como ya se mencionó en el teñido directo de hilado, en este proceso se emplean soluciones alcalinas y detergentes en caliente, obteniéndose descargas semejantes a las antes descritas. En muchos casos, puede practicarse el descruce y blanqueo en forma conjunta.

#### **J. Blanqueo**

Remueve la materia coloreada. Se utiliza sobre algodón y algunas fibras sintéticas después o en forma simultánea con el descruce y antes del teñido o estampado. El material textil se trata con una solución diluida de los agentes blanqueadores (agua oxigenada o hipoclorito de sodio) y tensoactivos. Después del blanqueo, la tela se enjuaga en agua y luego se trata con sustancias reductoras que eliminan el exceso del agente oxidante.

### K. Teñido

Es la etapa más compleja dentro de las operaciones de procesamiento húmedo; involucra una gran variedad de colorantes y agentes auxiliares de teñido. La calidad de la tintura depende del equipamiento empleado, la fórmula específica, los tintes y auxiliares de tintes que proveen el medio químico para su difusión y fijación sobre la fibra. La tintura puede realizarse en procesos discontinuos o de agotamiento y en procesos continuos o de impregnación.

Los procesos discontinuos de agotamiento se caracterizan porque el material textil está un tiempo más o menos largo en contacto con el baño de teñido, dando tiempo a que el colorante se fije en la fibra. El proceso se realiza de diferentes maneras:

- a) Con el material en movimiento y el baño en reposo, para lo cual las máquinas más comunes son:

La barca de torniquete: se usa básicamente para el teñido de tejidos de punto o jersey, felpas, alfombras y tejidos planos. La relación de baño, volumen de baño por kilo de material que se procesa, varía entre 1:30 a 1:15. Las relaciones de baño altas elevan el costo del teñido ya que para obtener la misma calidad de producto se requiere un mayor consumo de energía, colorante y productos auxiliares.

El jigger: en esta máquina se trabaja solamente tejidos planos, como popelinas, driles, cretonas y felpas. Hay mayor velocidad de circulación de la materia textil en forma de cuerda. La relación del baño promedio es de 1:15, con el consiguiente ahorro de productos auxiliares, agua y energía.

- b) Con el material en reposo y el baño en movimiento

Este proceso se utiliza para el teñido de hilados, ya sea en forma de madeja, conos, bobinas, tejidos de punto sintético y tejido plano. Se utilizan autoclaves verticales u horizontales.

- c) Con el material y el baño en movimiento

Con este método se ha conseguido el aumento de la producción de teñido, mejorando notablemente la uniformidad y el aspecto final de las telas. Las máquinas jet y overflow trabajan a altas temperaturas donde el movimiento del material no depende de un torniquete, sino de la inyección del baño por medio de una bomba que lo toma de la parte inferior de la máquina, para hacerlo pasar por una tobera Venturi,



lo que permite teñir a velocidades de circulación muy elevadas.

Los procesos continuos o de impregnación se usan principalmente para la tintura de tejido plano, aunque, para determinados colores, también se aplica a tejidos tubulares (de punto). La tela pasa en forma continua por un foulard que contiene una solución concentrada de colorantes y auxiliares. Luego se exprime y se fija el colorante ya sea por reposo en una cámara, o por medio de vapor en una vaporizadora o por calor seco a alta temperatura. Los tipos de fijación varían de acuerdo al colorante utilizado. El tipo de colorante empleado en la tintura determina los auxiliares utilizados: sales de sodio, cloruros, sulfatos y carbonatos como agentes sinergistas. Si bien en la actualidad se tiene la tendencia de suprimirlos, en tratamientos posteriores se emplean sales de cobre y cromo para la fijación de algunos colorantes, lo que mejora la solidez.

- Los colorantes directos son sustancias neutras que tienen gran afinidad con el algodón y la celulosa en general. Debido a su alta solubilidad es necesario utilizar sales (cloruros o sulfatos) para obtener un agotamiento óptimo. El efluente procedente de estas tinturas no es muy contaminante, pero presenta un alto grado de coloración.
- Los colorantes insolubles en agua, requieren de agentes reductores fuertes, tales como el hidrosulfito en medio alcalino que los transforman en la correspondiente forma y en esa forma sube sobre la tela. Luego se efectúa la oxidación sobre la tela, al aire, con perboratos o con  $H_2O_2$ . Posteriormente se debe eliminar el exceso de álcali con lavados en caliente. Cada uno de estos pasos está seguido de un enjuague en caliente. Generalmente estos colorantes provocan efluentes con altos valores de DQO.
- Los colorantes al sulfuro, como su nombre lo indica, contienen compuestos sulfurados en su estructura y se aplican en la fibra en estado reducido disueltos en sulfuro de sodio para luego oxidarse produciendo la coloración esperada. Las aguas de desecho contienen el baño de tintura y los enjuagues son alcalinos, altamente coloreados y tóxicos y constituyen uno de los efluentes más contaminados. Ha surgido una línea de colorantes llamados "sulfuros ecológicos" que utilizan otro tipo de reductores y requieren una menor cantidad de sulfuro de sodio para su disolución. Existe una tendencia mundial a no usar los colorantes al sulfuro.

- Colorantes en base naftol: azoicos insolubles. El tejido se impregna primeramente con un agente de desarrollo como el naftol; se exprime y eventualmente se seca en forma suave y luego se trata con una base diazotada o su correspondiente sal soluble para que se produzca el desarrollo (o copulación) del color, generándose en la fibra. Luego de la copulación se enjuaga jabonando enérgicamente y a ebullición. Los contaminantes principales se originan en las tinturas diazotadas, el beta-naftol y los enjugues.
- Colorantes reactivos: son los únicos colorantes que se unen a la fibra químicamente. Para ello inicialmente se disuelve el colorante y luego se agota con grandes cantidades de sal para lograr el desplazamiento del colorante hacia la fibra en el menor tiempo posible, evitando la hidrólisis del mismo en el agua que compite con la subida del colorante a la fibra. Inmediatamente se fija en medio alcalino (carbonato, hidróxido o silicato de sodio) entre 50 y 80 °C. Los enjugues comprenden lavados jabonosos a ebullición y un aclarado final con agua.

### **L. Estampado**

En contraposición al teñido, en el estampado se usan soluciones o dispersiones espesadas, de esta manera se evita que la partícula de colorante migre, reteniéndose el color en la superficie del estampado. De acuerdo con el diseño se usan pastas de almidón, dextrina o goma. Se realiza principalmente por dos procedimientos:

- Estampado por rodillos: método de trabajo continuo que mediante rodillos gravados en hueco transmite por contacto la pasta de estampado al tejido de acuerdo al diseño.
- Estampado a la lionesa o en la malla: Difiere del método por rodillos en que la pasta de impresión se transfiere al textil a través de las aberturas en mallas especialmente diseñadas. El proceso puede ser manual, semiautomático o completamente automático. El estampado puede ser en cuadros planos o rotativos, mientras que el manual y el semiautomático se procesan en cuadros planos únicamente.

Después del estampado y secado, el género debe someterse a un proceso de fijación de colorante. El método clásico de fijación es el vaporizado y su duración depende de la clase de colorante y del tipo de

fibra. En el estampado se producen contaminantes concentrados de importancia, originados en las máquinas de estampado y en las descargas propias de la preparación de pastas (cocina de colores).

### 2.2.2.1. Descargas del rubro algodonero

La figura 2.1 (CEPIS/REPAMAR, 1999) muestra el esquema del proceso productivo del algodón y los residuos que genera, la mayor contaminación orgánica se concentra en las operaciones de desengomado y descruce, y es menor en los procesos de teñido y estampado, mientras que la contaminación inorgánica proviene del lavado con sales de sodio, mercerizado, blanqueo y teñido. Los efluentes de esta manufactura suelen ser alcalinos, coloreados y con una DBO comprendida entre los 300 y 1000 mgL<sup>-1</sup>. Los principales contaminantes son: almidones y glucosa, ceras, pectinas, agentes humectantes, auxiliares, sulfuros, sulfitos, ácido acético, detergentes, hipoclorito, agentes reductores y colorantes no biodegradables. Los efluentes del acabado del algodón contienen fibras finas que ocasionan obstrucciones, diversos problemas mecánicos y de contaminación (Fernández, 1995).

En la tabla 2.3 se muestran las características de los efluentes textiles del rubro algodonero (Fernández, 1981, Crespi, 1995).

**Tabla 2.3 Características de las descargas de industrias algodoneras  
(Fernández, 1981; Crespi, 1995)**

Proceso	Volumen sobre el total	DBO sobre el total
Engomado y desengomado	15%	50%
Descruce y mercerizado	20%	30%
Lavado, teñido y blanqueado	65%	20%

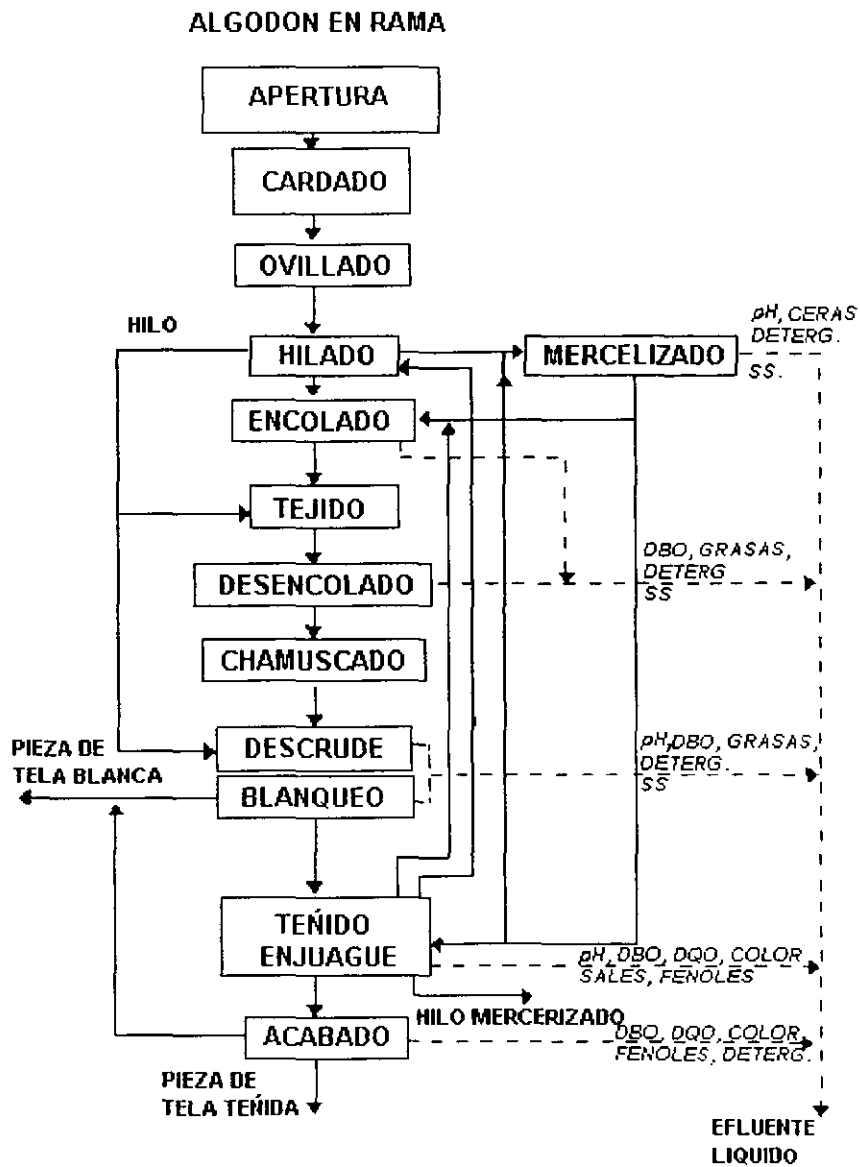


Figura 2.1 Proceso productivo del algodón (CEPIS/REPAMAR, 1999)

### 2.2.2.2 Descargas del rubro lanero

#### ii) Lana y sus mezclas (CEPIS/REPAMAR, 1999)

Habiéndose descrito para el caso del algodón las operaciones de cardado, peinado, hilado y tejido, que no aportan efluentes contaminantes, para el caso de la lana, se tratarán específicamente los procesos húmedos: lavado de la fibra cruda, batanado, carbonizado, procesos de tintura y acabado.

##### **A. Lavado de la fibra cruda**

La cantidad de impurezas que contiene la fibra de lana es importante. En algunos casos, alcanza hasta 60% del peso del vellón (fibra fina). De allí la capacidad contaminante de la industrialización de esta fibra, aunque muchas veces no se toma en cuenta que estas impurezas son elementos útiles dentro de un sistema de reciclaje integral (tierras fértiles y lanolina). Durante el lavado se eliminan en un medio acuoso la tierra, impurezas y materia grasa. Para ello se emplean soluciones tibias con detergente. Este proceso se realiza en barcas (tren de lavado) operadas en serie a través de las cuales el agua fluye en sentido contrario al que recorre la fibra. La descarga proveniente del lavado resulta ser la de mayor contaminación en la industria textil. Posee una elevada DBO y alta concentración de sustancias grasas y sólidos sedimentables o en suspensión.

Después del lavado, la lana sufre una serie de procesos secos de cardado y peinado e hilatura similares a los descritos anteriormente para el caso del algodón. Cuando la lana se somete al proceso de cardado para mejorar la cohesión de la fibra, se efectúa previamente una lubricación con productos de ensimaje para evitar la ruptura de las fibras: aceites minerales, animales o vegetales que se eliminarán en procesos venideros.

##### **B. Batanado**

En algunos casos se procede realizando sobre el tejido un proceso de batanado que modifica ciertas propiedades esenciales del tejido, como cuerpo, elasticidad y apariencia, utilizando jabones y detergentes en una solución de lejía a 30 o 40 °C, encogiendo el tejido entre rodillos y generando pocos residuos sólidos. A esta altura del proceso, la lana contiene gran cantidad de productos químicos que se separan en una serie de lavados y procesos de escurrimiento.

##### **C. Teñido y blanqueo**

En el teñido la contaminación potencial está en la tintura y en los ácidos orgánicos presentes; la concentración de colorante suele ser baja en el remanente pero hay que recordar que se manejan

volúmenes muy importantes. La carga inorgánica está formada fundamentalmente por sales de sodio que arrastran grandes cantidades del catión en el efluente. En el caso de utilizar Cr, el efluente es altamente tóxico. Cuando se lleva a cabo el proceso de blanqueo, se realiza por lo general con agua oxigenada.

#### **D. Carbonizado**

En algunas ocasiones, la última etapa del tratamiento es el carbonizado que elimina residuos vegetales, es decir materias celulósicas. Se utiliza para ello una solución diluida de ácido sulfúrico a alta temperatura. Se neutraliza con una solución de carbonato de sodio. Estos procesos originan emanaciones corrosivas y olores procedentes de los óxidos de azufre y descomposición de compuestos orgánicos que deberían resolverse por vía húmeda utilizando filtros adecuados.

En la industria de la lana el volumen de los efluentes líquidos depende considerablemente de las características del programa de teñido y de los métodos de enjuague utilizados.

Dejando de lado los efluentes del lavado de lana cruda, los desechos más perjudiciales se producen en el lavado posterior al batanado, ya que no sólo contienen detergentes y sosa cáustica, sino también aceites del cardado. Estos productos deben eliminarse completamente de la fibra y para ello se utilizan otros productos químicos que aumentan la carga contaminante total.

El pH de los efluentes combinados de los procesos húmedos de una fábrica lanera suele ser ligeramente ácido. Las consideraciones más importantes desde el punto de vista de la contaminación hídrica de una fábrica textil lanera se enumeran a continuación (Fernández, 1995).

Los contaminantes procedentes del lavado de la lana son los más fuertes de la industria textil y obstruyen las cañerías de alcantarillado y equipos de tratamiento, por lo que no deben ser descargadas a menos que se les haya practicado un tratamiento conveniente.

Se recomienda la recuperación mecánica de la grasa de la lana desde una óptica económica y ecologista, aunque ésta no incide fundamentalmente en el valor total de la descarga.

La contaminación derivada de los procesos húmedos postlavado, teñido y acabado es producida por los agentes químicos empleados.

Los efluentes del teñido arrastran una contaminación orgánica comparable a la doméstica, conteniendo básicamente sales (en algunos casos tóxicas, como las de Cr) y ácidos.

Los efluentes del lavado post batanado están fuertemente contaminados por el aceite de carda, detergentes y sosa utilizados en el batanado. La tabla 2.4 (Fernández, 1981, Crespi, 1995) muestra las

características del rubro lanero, la figura 2.2 (CEPIS/REPAMER, 1999) muestra el esquema productivo de los residuos que genera.

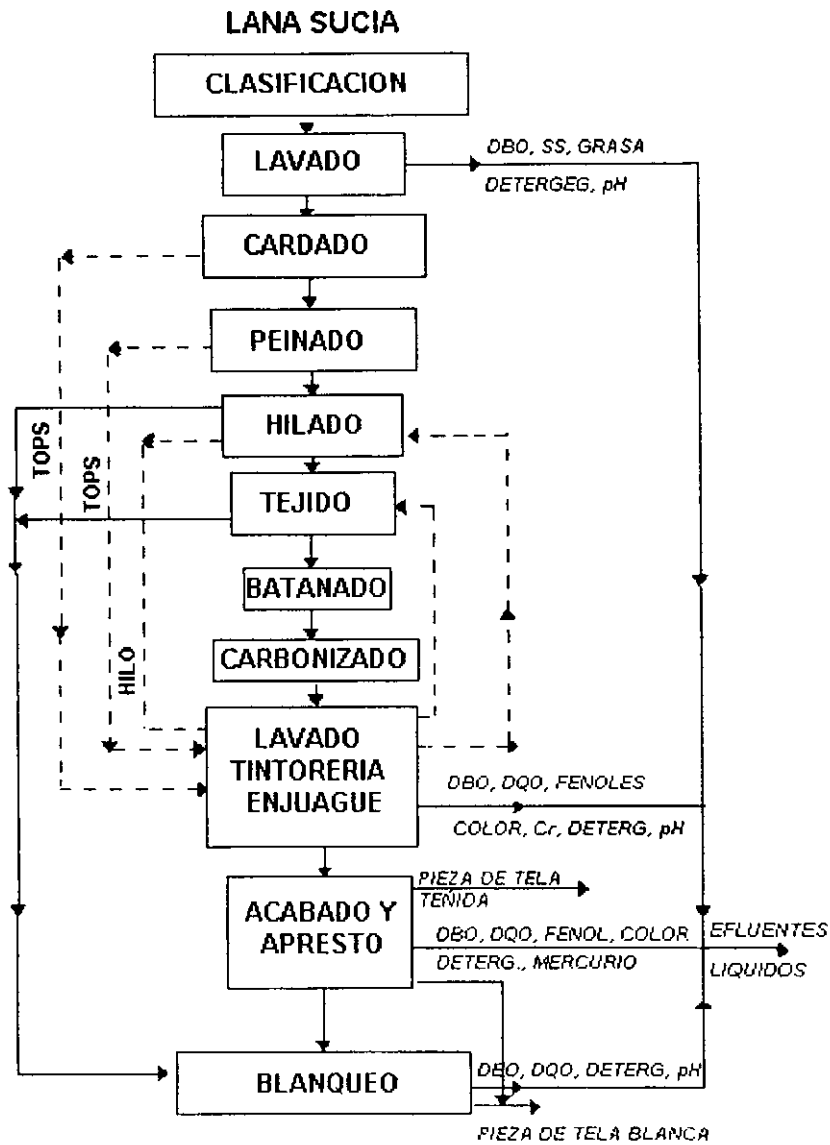


Figura 2.2 Esquema del proceso productivo de la lana (CEPIS/REPAMAR, 1999)

**Tabla 2.4. Características de las descargas de industrias laneras (Fernández, 1981; Crespi, 1995)**

Proceso	L H <sub>2</sub> O/kg de lana	DBO (mgL <sup>-1</sup> )	DQO (mgL <sup>-1</sup> )	SS (mgL <sup>-1</sup> )	SD (mgL <sup>-1</sup> )	Grasas (mgL <sup>-1</sup> )	PH
Lavado	10 - 40	5000-25000	10000-45000	12500	6600	4000	8 - 9
Batanado	5 - 20	4000-24000	6000-43000	11000	2800	3300	9 - 12
Carbonizado	30 - 80	200-500	200-700	750	1500-3000		3 - 10
Tintura	10 - 20	200-4000	500-5000				6 - 8

La tabla 2.5 muestra las características de los efluentes textiles de acuerdo al tipo de proceso y fibra (Fernández, 1981, Crespi, 1995).

**Tabla 2.5. Características de los efluentes líquidos textiles según el tipo de proceso y fibra (Fernández, 1981; Crespi, 1995)**

Parámetro	Proceso					
	Hilado	Tejido Algodón	Tejido Lana	Genero de punto	Estampado	Lavado de lana.
pH	5 - 12	8 - 12	5.5 - 8	6 - 11	7 - 10	8 - 11
DQO (mgL <sup>-1</sup> )	500-900	1000-3000	300-1000	800-1300	2000-4000	20000-60000
DBO (mgL <sup>-1</sup> )	150-350	300-1000	100-400	200-450	500-1500	8000-20000
*SEE (mgL <sup>-1</sup> )	50-150	50-300	100-150	50-150	200-600	6000-20000
Color Pt-Co	300-1000	300-3000	200-1500	100-1000	100-6000	100-500

\* SEE= Sustancias extraídas con éter

### 2.2.2.3 Potencial tóxico de algunas familias de productos químicos y auxiliares textiles.

Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA,1982), pueden presentar características tóxicas algunas de las familias indicadas en la tabla 2.6 (USEPA, 1982).

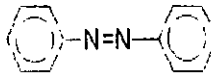
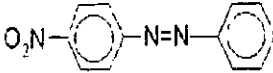
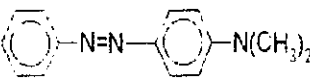
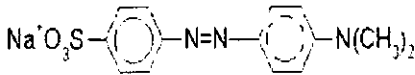
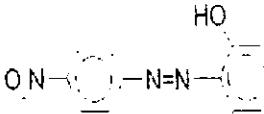
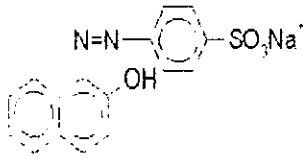
**Tabla 2.6 Productos químicos y auxiliares empleados (USEPA, 1992)**

Acidos/Alcalis	Detergentes/jabones/auxiliares
Suavizantes	Tintes de batea
Tintas de azufre	Tintes de naftol
Tintes básicos	Tintes directos
Tintes reactivos	Tintes dispersos
Aceleradores de tintes	Acidos metalizados
Tintes pigmentos	Aceites lubricantes
Auxiliares de tintes	



En 1974, la Asociación Ecológica y Toxicológica de las Industrias Manufactureras de Colorantes (ETAD por sus siglas en inglés) con sede en Suiza, inicio la elaboración de datos toxicológica, ecotoxicológica y sistemática que incluía a todos los colorantes comerciales. En la tabla 2.7 se muestra la compilación de colorantes que se clasifican como tóxicos por dicha asociación en 1986 (Anliker et al., 1998) y algunas estructuras de colorantes tipo azo (<http://quimba.dqb.uchile.cl/~fmartinez/Q134B/aminas/Aminas.HTML>).

**Tabla 2.7 Colorantes considerados como tóxicos por la asociación ecológica y toxicológica de las industrias manufactureras de colorantes (Anliker y col, 1998)**

Nombre Genérico	Número	Estructuras químicas	
Anaranjado ácido 156	26501		
Anaranjado ácido 165	28682	azobenceno (naranja)	p-nitroazobenceno (amarillo)
Azul básico 3	51004		
Azul básico 7	42595		
Azul básico 81	42598		
Rojo básico 12	48070	N,N-dimetil-p-(fenilazo)anilina (amarillo mantequilla) "carcinógeno"	anaranjado de metilo
Violeta básico 16	48013		
Amarillo básico 21	48060		
Amarillo directo 62	No disponible		
Diazo azoico, componente 20	37175		
Diazo azoico, componente 24	37155		
Diazo azoico, componente 41	37165	rojo para	anaranjado II

Posteriores estudios sobre la toxicidad de los colorantes guiaron a la prohibición de ciertos colorantes por algunos gobiernos, principalmente europeos. Las legislaciones ambientales holandesa y alemana han regulado el uso de los colorantes azo debido a que las aminas aromáticas, que generan cuando el colorante se degrada parcialmente en el ambiente, es decir, cuando se rompe el enlace azo, están prohibidas porque pueden causar cáncer en la piel cuando los periodos de contacto son largos. (<http://www.kommanet.nl/demo/ne020996.html>). Por otra parte, el 15 de julio de 1994, el Gobierno alemán promulgó una nueva regulación, que prohibía la manufactura, importación o ventas de textiles y ropa, que contenga ciertos colorantes azo dañinos, considerándose con esta característica a todos los azocompuestos que bajo condiciones reductoras puedan romperse y generar alguna amina carcinogénica especificada en la ley. Sin embargo, la nueva regulación no especifica ningún método oficial ni límite de control. A pesar de lo anterior, esta regulación fue vigente a partir de 1 de enero de

1995 (<http://www.cwis.polyu.edu.hk/~itc/vrspilot.htm>).

En el contexto de la Unión Europea, los diferentes países buscaron tener una legislación común en materia de regulación para ciertos colorantes, por lo que decidieron basarse en las legislaciones holandesa y alemana para unificar la ley. (<http://www.tdctrade.com/alert/eu9906.htm>). Sin embargo, no se ha logrado definir un método para evaluar la toxicidad de un colorante de los llamados tipo azo y existen discrepancias en relación con la aplicación de la ley de este tipo de pigmentos (<http://www.blla.org.uk/html/legislación/german-azo.shtml>).

En la actualidad, prácticamente se encuentra descartado el uso de colorantes al cromo y al sulfuro, los que podrían generar efluentes tóxicos, como así también el empleo de sales de mercurio, níquel, cinc, etc., utilizadas años atrás como agentes de acabado especiales. Determinados colorantes y detergentes pueden provocar la presencia de sustancias fenólicas en las descargas.

### **2.3 Residuos de la industria textil en México**

La industria textil es un generador de residuos sólidos y peligrosos estos últimos debido a: las características de sus procesos, la toxicidad de sus residuos, así como por la considerable cantidad de que se produce.

El total de residuos peligrosos reportados para 23 industrias de la ZMCM según un estudio realizado por la Comisión Ambiental Metropolitana (CAM) en colaboración con la Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ) en 1998, es de 1,601,904 m<sup>3</sup> por año de aguas residuales provenientes de los procesos de pretratamiento, blanqueo, teñido, y acabado, 462 ton/año de lodos de tratamiento de aguas residuales, 59 m<sup>3</sup>/año de aceites gastados, 790 piezas/año de envases y tambos usados en el manejo de materiales y residuos peligrosos; además de 771 ton/año de residuos sólidos municipales, entre otros. (CAM-GTZ, 1998)

Desde el punto de vista de la generación de residuos peligrosos existen tres dimensiones de análisis que deben conjugarse para definir líneas en las políticas de este tipo de residuos. Estas son: ramas industriales Clasificación Mexicana de Actividades y Productos (CMAP), tipos de residuos y regiones

vulnerables (tabla 2.8). La priorización de ramas industriales en materia de residuos peligrosos se fundamenta en el volumen de residuos generados, estimados a partir de factores de generación, además de la experiencia documentada y subjetiva existente en México (INE/SEMARNAP, 1996).

**Tabla 2.8 Características que hacen a un residuo peligroso (INE/SEMARNAP, 1996)**

Clave CMAP	Residuos de la industria textil en México			
	Giro industrial	Salud ambiental	Contingencia	Movilidad ambiental
3211-3212	Textiles	Toxicidad	Reactividad	Lodos
3213-3214		Persistencia	Inflamabilidad	Aguas de proceso Líquido en general

Los procesos considerados como principales fuentes de generación de residuos peligrosos en la industria textil son la pre-limpieza (descrude, mercenizado, etc.), blanqueo, teñido y acabado, estos procesos se describieron de manera detallada en la sección 2.2. Sin embargo, una estimación de la generación aproximada para cada uno, es prácticamente imposible de realizar, ya que pocas empresas llevan un registro del consumo de agua y sustancias empleadas. El destino de residuos reportados por las 23 empresas mexicanas consideradas en el estudio realizado por la CAM-GTZ considera 7 opciones, las cuales pueden englobarse de manera general en reutilización y destino final, como se presentan a continuación (CAM-GTZ, 1998):

**Reutilización de residuos**

1. Reaprovechamiento energético
2. Reuso – reciclaje

**Destino final**

3. Almacenamiento temporal en planta
4. Drenaje municipal
5. Tiradero municipal o relleno sanitario
6. Confinamiento controlado
7. Destino no indicado

Los residuos reportados en el estudio realizado a 23 industrias en la ZMCM por la CMA-GTZ en el rubro textil se muestran en la tabla 2.9 (CMA-GTZ, 1998).

**Tabla 2.9 Residuos reportados con mayor frecuencia en la industria textil (CMA-GTZ, 1998)**

Tipo de residuo	Frecuencia (%)
Aceite lubricante gastado.	13
Agua residual de los procesos de tratamiento, blanqueo, teñido y acabado.	11
Cartón, papel y polietileno.	12
Conos, carretes, bobinas de plástico y/o cartón.	5.4
Envases o tambos vacíos usados en el manejo de sustancias y residuos peligrosos.	7.2
Estopa, pelusa e hilos.	8.1
Lodos de tratamiento de agua residual.	3.6
Residuos de telas.	14.5
Residuos sólidos municipales.	18
Tapos estopa y aceites.	3.6
Otros.	3.6
<b>Total.</b>	<b>100</b>

El rubro "otros" agrupa a residuos que son característicos de las empresas dedicadas a la elaboración de hilos y a la confección. Estos residuos son tarimas de madera (2,400 piezas/año), cuchillas metálicas de corte (144 piezas/año) y ganchos de plástico (110,000 piezas/año). También se incluyeron residuos metálicos "chatarra" (54 ton/año) y hollín de calderas (0.5 ton/año). En la tabla 2.10 se muestra el manejo de residuos, como porcentajes totales de los residuos generados anualmente por las empresas visitadas (CMA-GTZ, 1998).

**Tabla 2.10 Manejo de los residuos sólidos generados en el giro textil (CMA-GTZ, 1998)**

Destino	Generación anual (%)
Almacén temporal	0.02
Combustible alternativo	2.75
Confinamiento controlado	0.03
Reciclaje/reuso	21.2
Tiradero municipal/relleno sanitario	75.5
No indicado	0.5
<b>Total</b>	<b>100</b>

Algunas de las 23 industrias del estudio mencionado se dedican principalmente al teñido y acabado de los materiales textiles, consumiendo considerables cantidades de agua en la elaboración de sus productos. Las empresas que utilizan estos procesos, reportan una generación total de 1,601,904 m<sup>3</sup>/año de aguas residuales. El volumen de agua que se vierte directamente al drenaje municipal sin tratamiento previo de acuerdo con el estudio realizado, es de 861,937 m<sup>3</sup>/año del total de generación.

En el caso de las industrias que tratan sus aguas, el tratamiento consiste generalmente en procesos fisicoquímicos y biológicos. Los tratamientos preliminar y primario comprenden métodos de igualación, neutralización y destoxificación. El tratamiento secundario implica métodos de aireación, reducción y oxidación química, filtración, evaporación y tratamiento biológico que se realiza mediante lodos activados. El tratamiento terciario comprende procesos más complejos y por consiguiente más costosos: adsorción con carbón activado, intercambio iónico (para remover sales, nitratos y fosfatos), ultrafiltración y ósmosis inversa. La figura 2.3 muestra algunos de los procesos utilizados comúnmente por la industria textil, en los cuales se concentran los contaminantes contenidos en el agua residual, haciendo así, imperiosa la necesidad de un tratamiento de estabilización y una disposición ambientalmente adecuada.

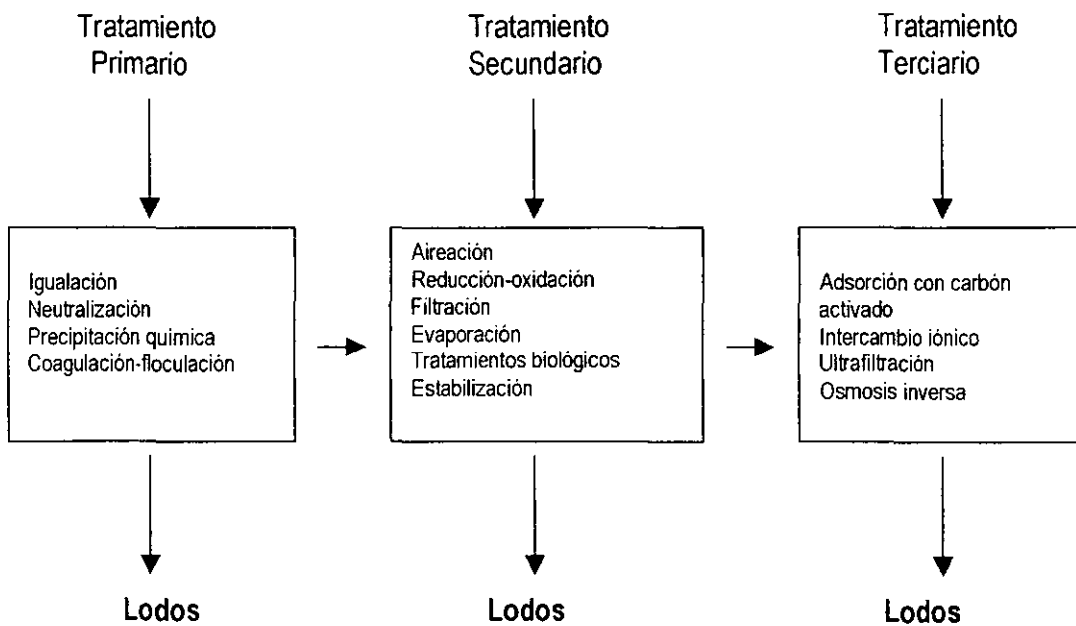


Figura 2.3 Generación de lodos en el tratamiento de aguas residuales de la industria textil

### 2.3.1 Reutilización de los residuos generados en la industria textil

#### Reciclaje/reuso.

El reciclaje o reuso de los residuos generados puede realizarse dentro de la empresa o éstos pueden enviarse a una compañía externa. Sin embargo, la gran mayoría de las empresas que reciclan/reusan los residuos internamente no llevan un registro de las cantidades reutilizadas, por esta razón, no es posible llevar a cabo un análisis detallado del manejo. Como puede observarse en la tabla 2.10, el 21.2% de los

residuos generados recibe un reciclaje o reuso externo. Las cantidades de residuos peligrosos que reciben este manejo son mínimas y se tratan principalmente de aceites lubricantes gastados (0.8 ton/año), envases y tambos vacíos usados en el manejo de materiales y residuos peligrosos (670 piezas/año). En el caso de estos contenedores, el reciclaje/reuso consiste en enviarlos a una empresa autorizada por el INE para acondicionarlos nuevamente.

Actualmente, predomina el reciclaje o reuso de residuos industriales no peligrosos, debido a que entre los principales residuos que se generan están el cartón y papel (87.7 ton/año), pelusa, estopa e hilos (124 ton/año), recortes de telas (202 ton/año), polietileno (12.6 ton/año), tarimas de madera (2400 piezas/año) y ganchos de plástico (110,00), para los cuales existe un mercado más atractivo de reciclaje.

#### **Reaprovechamiento energético(CMA-GTZ, 1998)**

Sólo el 2.75% (54 ton/año) del total de los residuos reportados en el giro se someten a reaprovechamiento energético. Entre estos residuos están los siguientes:

- a) Aceites gastados.
- b) Estopas impregnadas de aceite, solventes y colorantes.

Las empresas que ofrecen los servicios de recolección y tratamiento de residuos peligrosos con elevado poder calorífico son las encargadas de la elaboración de combustible alterno, para reaprovechar su potencial energético en hornos de cemento, sin embargo, las empresas generadoras en la mayoría de los casos no conocen el destino final de sus residuos con elevado poder calorífico, por lo que resulta difícil estimar la cantidad de residuos que reciben este tipo de manejo.

### **2.3.2 Disposición de los residuos generados por la industria textil**

#### **Almacenamiento temporal en la planta (CMA-GTZ, 1998)**

Las empresas generadoras de residuos generalmente los almacenan por varias semanas o por varios meses hasta tener una cantidad considerable que les sea redituable para enviarlos a tratamiento, o bien, mientras se decide cuál será el manejo de los mismos. Estos residuos son generalmente aceites y

materiales impregnados y representan el 0.02% (0.3 ton/año) de la generación total de los residuos reportados.

**Tiradero-basurero municipal o relleno sanitario (CMA-GTZ, 1998)**

El destino final de los residuos generados no es ciertamente el óptimo en la mayoría de los casos, muchos están siendo dispuestos inadecuadamente en tiraderos o rellenos sanitarios, especialmente aquellos en los que el reciclaje o reuso no es una práctica común, como es el caso de los residuos generados en equipos de control de emisiones y en plantas de tratamiento. En este contexto se incluye a los polvos y filtros del sistema extractor de aire, lodos provenientes del tratamiento de agua residual y lavado de gases, etc. El 75% de la generación total de los residuos reportados por las industrias se disponen en el tiradero o relleno sanitario. Estos desechos generalmente son una mezcla de: lodos de la planta de tratamiento (462 ton/año), 285 ton/año de residuos sólidos municipales (771 ton/año) y 5,808 piezas/año de residuos no peligrosos (cuchillas de corte, conos, carretes y bobinas de plástico y/o cartón). Los porcentajes de residuos que reciben este manejo se muestran en la tabla 2.11.

Otros tipos de residuos que frecuentemente reciben este destino se relacionan indirectamente con la producción, los cuales se generan en la maquinaria, equipo y durante la limpieza de éstos (estopas, trapos y aserrín), así como los equipos de seguridad personal como guantes impregnados de aceite, filtros de mascarillas, etc. En cuanto a este tipo de residuos, cabe resaltar que en muchas ocasiones la industria no tiene cuantificado el volumen exacto sobre la generación y los datos proporcionados corresponden a correlaciones con la compra de estos materiales. Los residuos generados en las operaciones de manipulación de materiales, incluyendo los envases, empaques y contenedores de sustancias auxiliares, agentes químicos, colorantes y materia prima, también reciben éste manejo. La gran mayoría de estos compuestos se consideran como peligrosos en la normatividad y sin embargo sus envases o sacos no están siendo dispuestos adecuadamente (CAM-GTZ, 1998).

**Tabla 2.11 Residuos enviados a tiradero. (CMA-GTZ, 1998)**

Tipo de residuo	% de residuos enviados a tiradero
Residuos no peligrosos	19
Lodos de tratamiento	30
Residuos sólidos municipales	51
<b>Total</b>	<b>100</b>

### **Confinamiento controlado (CMA-GTZ, 1998)**

Las industrias citadas en el estudio reportan únicamente el envío anual de 0.5 toneladas (0.03 % del total de residuos generados) de sus residuos peligrosos a confinamiento controlado. Estos residuos son lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales con contenido de metales pesados y hollín de calderas.

### **Destino no indicado (CMA-GTZ, 1998)**

El porcentaje de la generación total reportada de los residuos que tienen un destino no indicado es de 0.5%, debido a que las empresas reportaron que se reciclaban o reutilizaban por algún tercero pero no se proporcionaron los datos del mismo. Los residuos cuyo destino no está indicado son principalmente aceites gastados (4m<sup>3</sup>/año) y tambos usados en el manejo de materiales o residuos peligrosos (120 piezas/año). Probablemente grandes cantidades de éstos residuos se disponen en tiraderos clandestinos, rellenos sanitarios, en la red de alcantarillado o quemados inadecuadamente.

Durante la elaboración del estudio en muchos casos se tuvieron dificultades al recabar la información principalmente en lo referente a los volúmenes generados de residuos. Esto se debió a que, en general, las empresas que llevan un registro de los volúmenes generados y transportados de los residuos son sólo aquellas en donde el manejo lo realiza una compañía autorizada por el INE o cuando se obtiene un beneficio económico por concepto de la venta de materiales para reciclaje, además en muchos casos los residuos se mezclan y transportan por los camiones recolectores pertenecientes al municipio o delegación, o en otros casos por empresas particulares contratadas para la recolección de los residuos sólidos municipales. Por ello, el volumen de residuos peligrosos considerado, muchas veces no corresponde al volumen real generado y los costos reportados por manejo varían para un mismo tipo de residuo. Se observó que el manejo interno de los residuos es inadecuado ya que no se cuenta con contenedores apropiados para el almacenamiento de los residuos peligrosos y en pocos casos éstos se almacenan en áreas que cumplen con los requisitos de seguridad establecidos en la normatividad; aunado a lo anterior, se encontró que algunas empresas no cuentan con personal capacitado para su manejo. Asimismo, pocas empresas tienen instrumentadas medidas para la reducción en la fuente o minimización de los residuos generados. En cuanto al manejo de efluentes, la mayoría de las empresas que autorizaron ser visitadas cuentan con sistemas de tratamiento de aguas residuales o con planes a mediano o largo plazo, varias tienen contemplada la instalación de plantas de tratamiento, sin embargo se estima que alrededor del 50% de los efluentes están siendo descargados sin tratamiento alguno.



## **CAPÍTULO 3. MANEJO Y ESTABILIZACIÓN DE LODOS**

Con la finalidad de comprender mejor el manejo y la estabilización de lodos, en este capítulo se presentan las generalidades de algunos de los procedimientos usados en la digestión de lodos municipales, haciendo énfasis en los tratamientos aerobio y anaerobio.

### **3.1 Manejo de lodos**

Para iniciar se muestra la situación referente al manejo de lodos en México y las alternativas usadas en otros países.

#### **3.1.1 Lodos residuales en diferentes países**

La tecnología de tratamiento para lodos residuales generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales en Estados Unidos y Europa se realiza utilizando alguno de los siguientes cuatro procesos:

- Digestión anaerobia
- Digestión aerobia
- Tratamiento químico
- Incineración

La selección de alguno de estos procesos para la estabilización de un lodo en particular depende de varios factores como: la cantidad y calidad de lodos a tratar, las condiciones particulares del sitio y la situación financiera en cada caso (Bruce, 1984; Lue Hing, 1992).

En muchos países, la utilización del lodo requiere de una infraestructura costosa pero con fines justificados, ya que soluciona problemas de contaminación e incorpora nutrientes reciclando elementos vitales en los ciclos biológicos naturales además de convertir un residuo peligroso en un recurso aprovechable y no peligroso (ver tabla 3.1). Así, la denominada gestión de excelencia, destina cada residuo a su tratamiento: reciclaje, composteo, incineración y vertedero. Como ejemplo

el Plan de Residuos de Holanda fija objetivos del 30% de reciclaje, un 30% de compostaje, un 30% de recuperación de energía y el 10% de vertido como residuos no aprovechables. En Viena, el esquema es de 50% de reutilización energética, 29% de reciclaje, 12% de compostaje y 9% a vertedero. (<http://www.emision.com/161.htm>).

**Tabla 3.1 Manejo de lodos en algunos países**(<http://www.emision.com/161.htm>)

País	Manejo de lodos
Europa, Australia, E. U. y otros países.	Actualmente se realizan investigaciones para utilizar los lodos tratados, como freno a la contaminación de los acuíferos por productos fitosanitarios y sus impurezas, además servirán para acelerar la recuperación de suelos que ya estén afectados. También se aplican como fertilizantes en tierras agrícolas.
España	Los residuos de materias orgánicas procedentes de la recolección de residuos separados de origen urbano, así como de la industria, aguas residuales y lodos de plantas de tratamiento pretenden ser utilizados en la agricultura ya que se considera el destino más adecuado para este tipo de materias desde el punto de vista ambiental y económico. Se estudia la aplicación de lodos residuales en el control de filtraciones de productos fitosanitarios al acuífero. (Waste magazine ambiental, 2001)
Dinamarca	La gran parte de los lodos estabilizados se usan como fertilizante en tierras laborales. El porcentaje de reutilización de los lodos de aguas residuales es del 72%, el 20% se destina a la incineración, y el 7% se dispone. (Residuos en Dinamarca, 1997)
Chile	En 1999 fue aprobado el anteproyecto del "Reglamento para manejo de lodos no peligrosos generados en plantas de tratamiento de aguas" estableciendo que la operación de plantas de tratamiento de agua potable, agua residual urbana y residuos industriales líquidos genera gran cantidad de lodos, los cuales deben ser tratados y dispuestos de manera adecuada para prevenir impactos negativos en el ambiente.(Programa Priorizado de Normas, 1999)
Argentina	Se han implementado plantas de compostaje de lodos residuales, para su posterior aplicación como biosólidos en la agricultura. ( <a href="http://www.medioambientenews.com/planta_de_compotaje.htm">http://www.medioambientenews.com/planta_de_compotaje.htm</a> )

En general la aplicación de lodos residuales no peligrosos en suelos agrícolas, una vez estabilizados y considerando las características del suelo y el lodo a disponer, es una práctica muy común en países desarrollados por razones prácticas y económicas (Ottaviani et al., 1991). En este sentido diversos autores han marcado las pautas para poder disponer de manera ambientalmente segura este tipo de residuos, como se muestra brevemente a continuación: los lodos residuales tienen valor fertilizante y mejoran también las propiedades físicas de los suelos (Tester, 1990). La dosis de aplicación se suele fijar en función de los requerimientos del cultivo en N y P. La productividad del suelo aumenta frecuentemente, a causa del llamado efecto de la materia orgánica que se produce después de la aplicación de lodos residuales. La materia orgánica juega un importante papel en la movilización y adsorción de diferentes elementos en los suelos (Schnitzer, 1991), así, el análisis de

las distintas fracciones orgánicas suministra información sobre la mineralización de los lodos y la formación de humus (Genevini et al., 1986). También diversos metales pesados y microcontaminantes orgánicos pueden estar presentes en los lodos; llegando a afectar a la cadena alimenticia a través de los cultivos y contaminar las aguas freáticas (Legret y Juste, 1988; Gennaro et al., 1991). Por estas razones, el Consejo de las Comunidades Europeas ha establecido límites obligatorios para las concentraciones de metales pesados en los lodos residuales que se apliquen a los suelos, y así prevenir riesgos de contaminación. (CEC, 1986). Dichos límites han sido fijados para suelos con pH comprendido entre 6.0 y 7.0. Si los lodos se añaden a suelos con pH menor de 6, debe tenerse en cuenta la capacidad de asimilación de dichos metales por las plantas.

En el caso de las manufactureras textiles que tienen una importante cantidad de lodos y agua residual que disponer o reutilizar, generalmente los residuos textiles presentan bajos contenidos de metales que puedan afectar a los cultivos y animales. En general, los lodos textiles presentan contenidos de metales más bajos que los lodos municipales. Ocasionalmente elementos como Zn, Cu, Cr, etc. pueden incrementarse y convertirse en un factor limitante en caso de disponerlos en suelos de cultivo. Frecuentemente los contenidos de P y K de los residuos textiles son mínimos (de 0.02 a 0.1% del peso seco). Por otra parte, el nitrógeno puede ser suficiente para proveer algunos beneficios como fertilizante (1.5%), de este modo, si la disposición en suelo de los residuos textiles se hiciera tomando como base estrictamente a los componentes orgánicos, muchos residuos podrían ser aplicados sin peligros a los terrenos de cultivo (Hornick y Kanfman, 1983).

### **3.1.2 Lodos residuales en México**

En México no existe una cifra oficial reportada sobre la producción de lodos generada en el país. Muy pocas son las plantas que realizan algún proceso de estabilización a los lodos, ya que las plantas de tratamiento de aguas residuales que existen en operación, carecen de las instalaciones para llevar a cabo el tratamiento necesario y la disposición final adecuada a los lodos generados. Los procesos más comúnmente utilizados para la estabilización de lodos municipales son los de digestión aerobia y el tratamiento con cal, procesos adoptados probablemente por su facilidad de operación. En menor proporción se usa el composteo y muy rara vez, la digestión anaerobia (Moeller, 1997).

De los lodos generados en PTAR una gran parte de éstos es vertida en los sistemas de alcantarillado, en cuerpos de aguas superficiales o bien se disponen en basureros a cielo abierto sin tomar las medidas de protección adecuadas para evitar la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas o la atracción de vectores, generando problemas de contaminación de los mantos freáticos y de salud pública.

Si no existen registros en el país de la generación de este tipo de residuos en general, mucho menos para un rubro específico de la industria, como es el caso de la industria textil.

En México los lodos residuales han significado un grave problema, estos pueden ser reutilizados sin riesgos a la salud y al ambiente ya que se ha demostrado que incrementan del 10 al 85% el rendimiento de los cultivos en relación con fertilizantes comunes, así, estos desechos podrían ser aprovechados de diferentes maneras después de ser sometidos a diversos procesos de estabilización, en cualquiera de los casos, el biosólido podría aplicarse como fertilizante dependiendo de las características del suelo, sin embargo debido a la alta concentración de patógenos que presentan los lodos en México, se consideran como residuos peligrosos y son mandados a confinamientos o incinerados, en vez de aprovecharse para mejorar el suelo de dos terceras partes del territorio nacional que presentan problemas de salinidad y sodicidad (altos contenidos de sales y sodio) ([http://www.dgi.unam.mx/boletin/bdboletin/2000\\_432.html](http://www.dgi.unam.mx/boletin/bdboletin/2000_432.html)).

Un hecho que aún no ha podido controlarse totalmente en países como México y que atenta contra las bondades del biosólido, es la descarga de desechos industriales a la red de alcantarillado municipal mientras en países como Francia y Estados Unidos, la utilización de biosólidos es una práctica habitual, en donde las empresas encargadas del sistema de drenaje pagan a intermediarios para transportar el residuo hasta el campo (<http://www.agro.uba.ar/agrotxt/siav/notas/biosol.htm>).

### **3.2 Manejo ambientalmente adecuado de lodos**

Con lo planteado anteriormente, la estrategia general que guíe el manejo adecuado de lodos debe contener acciones de: prevención, reuso o revalorización y disposición ambientalmente adecuada de los mismos. La prevención consiste en reducir potencialmente la generación de lodos al reducir la

contaminación y uso del agua en la fase de la producción. El reuso o revalorización del agua y/o contaminantes como de los lodos generados se puede lograr potencialmente reciclando el agua, metales u otros materiales residuales o generados en los procesos de producción, sin embargo el lodo generado que no pueda ser revalorizado debe disponerse finalmente, de manera ambientalmente adecuada y segura. De acuerdo a los diferentes procesos productivos, se pueden presentar las siguientes alternativas: (CEPIS/ REPAMAR, 1999)

- a) Lodo peligroso
- b) Lodo no peligroso

a) Lodo peligroso por la presencia de contaminantes tóxicos de acuerdo a lo establecido en México por la norma NOM-052-ECOL-1993 y de no existir norma nacional, lo establecido por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, (USEPA, por sus siglas en inglés) en sus apartados 260 y 261. En este caso las condiciones de caracterización, manejo, transporte, almacenamiento, tratamiento y disposición deberán apegarse a lo establecido en las normas mexicanas.

b) Lodo no peligroso, porque las concentraciones de sus componentes son inferiores a los valores establecidos por la NOM-052-ECOL-1993 o bien por la USEPA en sus apartados 260 y 261. Dentro de este último grupo se pueden establecer subcategorías, atendiendo a criterios microbiológicos específicos y al uso que puede darle, así como a la disposición final de los mismos.

b.1) El lodo es de calidad tal que puede ser procesado como un biosólido con la intención de reusarlo o revalorizarlo como mejorador de suelo en lugares como cementerios, bosques, jardines públicos, aeropuertos, etc. Se recomienda seguir los lineamientos del apartado 503 de la USEPA con la modificación de los criterios microbiológicos atendiendo a lo señalado en las tablas 3.2 y 3.3 para clasificar los biosólidos como Clase A o B. (USEPA, 1994,1995)

**Tabla 3.2 Criterios microbiológicos para biosólidos Clase A (USEPA 1994, 1995)**

Parámetro	Concentración
Coliformes fecales	<1000NMP/g ST
Huevos de Helminos	< 5 HE viable/g
Salmonella sp	< 100 NMP/g

**Tabla 3.3 Criterios microbiológicos para biosólidos Clase B (USEPA 1994, 1995)**

Parámetro	Concentración
Coliformes fecales	Media Geométrica de 7 muestras < o igual a $2 \times 10^6$ NMP o UFC/g
Huevos de Helmintos	15/g
Salmonella sp	$10^3$ /g

NMP: número más probable, UFC: unidades formadoras de colonias, ST: sólidos totales

b.2) Los lodos son asimilables a los provenientes del procesamiento de agua residual doméstica como residuos urbanos pero, los generadores no desean darles el tratamiento requerido para su transformación en biosólidos, o bien, no se interesan en participar en las acciones necesarias para su revalorización. En este caso su disposición puede hacerse en un relleno sanitario de tipo municipal, con las mismas restricciones que la USEPA establece para ese tipo de desechos.

b.3) Los lodos no llegan a tener la característica de domésticos pero tampoco se clasifican como residuos peligrosos, o bien, han sido residuos peligrosos que por tratamiento han dejado de serlo y permitir su disposición. En este caso la disposición puede hacerse en un relleno sanitario controlado, este relleno deberá cumplir con los lineamientos de impermeabilización, captación de lixiviados, programa de contingencias normales a un relleno sanitario municipal pero el acceso deberá ser controlado, totalmente cerrado al público y deberá haber un registro de los lodos depositados. El sistema de manejo de este tipo de residuos debe ser organizado, documentado y controlado, para lo cual se debe implementar una serie de regulaciones que definan la clasificación del lodo, valores límite para contaminantes tóxicos y lixiviados, procedimientos para la caracterización de lodos, transporte, almacenamiento, tratamiento y disposición final, etc., que permitan realizar un manejo ambientalmente adecuado y seguro, que no cause afectaciones a la salud de la población ni al ambiente. La aplicación de reglamentación, permitirá regular y controlar todas las actividades del sistema de manejo de los lodos en todas y cada una de sus etapas (desde la generación hasta la disposición final) y sancionar a quienes no cumplan con lo establecido para el efecto.

### 3.2.1 Prevención de generación de lodos

Pocas son las industrias que tienen una optimización de las cantidades y calidades de lodos generados. Por la diversidad y la estructura particular de cada una de ellas, la optimización requiere de un análisis individual. La prevención de la generación de lodos, se puede lograr tomando medidas

que incentiven a los sectores industriales a aplicar programas de producción limpia, a reciclar materiales y/o subproductos generados en el proceso o a modificar los procesos de producción que minimicen la generación de estos residuos.

### **3.2.2 Métodos generales utilizados para caracterización de lodos**

Para la caracterización de lodos se pueden aplicar dos procedimientos:

- a) Análisis de componentes, se puede realizar a través de un balance de masa del proceso generador del lodo utilizando la información de la calidad de materia prima utilizadas.
- b) Análisis de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y biológico infecciosos (CRETIB) del lodo, para determinar el tipo al que corresponde.

Dentro de los procedimientos correspondientes para su análisis deben tomarse en cuenta los siguientes aspectos: equipo utilizado para el análisis, y Normas y métodos aplicados para la determinación de los componentes y características.

### **3.2.3 Reciclaje y reuso de lodos**

Dependiendo de la composición y tipo de lodo, puede reciclarse para recuperar ciertos materiales presentes (de ser necesario adecuarlos según los requerimientos del proceso), utilizarse como fertilizante para mejorar suelos (en terrenos autorizados), aquellos que cumplan con características determinadas por la autoridad correspondiente, ya sea en forma cruda o después de algún tratamiento o aprovecharlos por su contenido energético. Los lodos orgánicos a partir de un mínimo poder calórico, pueden ser incinerados para recuperar la energía, generando electricidad o produciendo vapor (principio-desecho-a-energía), pero restringiendo aquellos que no pueden ser eliminados por este procedimiento, debido a las características de sus componentes.

Los tratamientos que se deben dar a los lodos, dependerán de las características requeridas para que cumplan totalmente con los requisitos necesarios, ya sea para su reuso, revalorización (tratando en lo posible de recuperar su valor material) y darle un uso benéfico, utilizando para esto procedimientos viables de acuerdo a las características de los lodos generados en las industrias y a

la disponibilidad de tecnología, los mismos que deben ser efectivos, fáciles de aplicar y que en lo posible no impliquen elevados costos.

#### **3.2.4 Disposición final de lodos**

La disposición final se debe considerar como el último paso dentro de una estrategia general de manejo de lodos. La disposición dependerá del tipo de lodo. Los sitios de disposición deberán contar con sistemas técnicos de operación y diseño sencillos, con mínimos requerimientos de operación, control, supervisión y mantenimiento. Como estrategia para conseguir estos propósitos, se plantean los siguientes puntos:

- a) Aplicar un concepto de manejo basado principalmente en la separación de los diferentes tipos de lodos y control de las actividades de la disposición tales como: calidad de lodos aceptados que cumplan totalmente con los requisitos exigidos en el lugar de la disposición para evitar generar emisiones secundarias de subproductos (gases, lixiviado), registro, monitoreo, análisis de lixiviados, etc.
- b) Disponer en forma separada los lodos incompatibles o de diferente calidad, para evitar la mezcla de los diferentes contaminantes. Tener un sistema especial en las áreas de disposición para logra drenar, coleccionar y tratar los lixiviados generados. Los sitios para disposición final de lodos deben ser cuidadosamente seleccionados, diseñados técnicamente, tomando en cuenta criterios geológicos, estabilidad de pendientes, protección de la erosión, provisión de servicios, factores socioeconómicos, etc.

#### **3.3 Tratamiento de agua residual en la industria textil**

El tipo de residuos producidos en una Planta de Tratamiento de Agua Residual Industrial, será en muchos casos distintos de los generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas, caracterizándose principalmente por los residuos arrastrados o solubilizados en el agua utilizada en la elaboración del producto.



En el caso de la industria textil la mayor parte de las aguas residuales se caracteriza por:

- Gran variabilidad de caudal y carga contaminante.
- Bajo contenido en materias coloidales y en suspensión.
- La mayor parte de su contaminación se presenta en forma soluble.
- Generalmente presenta fuerte coloración.
- La carga orgánica media expresada como DBO, es de aproximadamente el doble del agua residual urbana.

Las descargas presentan un déficit en nutrientes y no contienen microorganismos patógenos. Los principales componentes del agua residual son las impurezas que se encuentran en las fibras naturales y compuestos químicos agregados durante los procesos empleados para el tratamiento de la fibra, hebras o tejidos.

Las plantas de procesamiento textil utilizan una amplia variedad de tintes y otros compuestos químicos, incluidos los ácidos, bases, sales, agentes humectantes, etc.. Muchos de estos no permanecen en el producto textil terminado sino que se desechan después de un uso específico. El efluente combinado de una planta textil, por tanto, puede contener cualquiera de estos compuestos o todos. La mayoría de los agentes químicos empleados en la industria textil son considerados como peligrosos.

La descarga de estas sustancias en el medio ambiente puede causar perjuicios a la salud y al bienestar de una comunidad expuesta o al ecosistema, creando serios peligros para la salud y enfermedades de naturaleza crónica. Las pruebas de toxicidad mediante ensayos biológicos aplicadas a los efluentes de las plantas textiles han demostrado distintos grados de toxicidad acuática. Muchos residuos tratados por las plantas muestran un bajo nivel de toxicidad en varias pruebas, mientras que otros han mostrado una alta toxicidad acuática incluso en concentraciones relativamente bajas, sin embargo actualmente se presentan problemas tales como:

No se conoce la identidad exacta de estos tóxicos ni la de los precursores. Este tema se encuentra actualmente en estudio. A pesar de la falta de información específica, los agentes químicos, tintes y procesos empleados en la industria textil permiten establecer ciertas generalidades (CSIC, 2001).

Los tipos de sustancias que se pueden esperar predominan en las aguas residuales de la industria textil son: metales derivados de los tintes, surfactantes no biodegradables, detergentes, emulsificantes y dispersantes, provenientes del procesamiento húmedo, agentes decolorantes de tintes como el permanganato y el sulfoxilato-formaldehído y el dicromato, fenoles, solventes aromáticos, ácido de metileno, cloro, percloroetileno, ácido oxálico, etc. por mencionar unos cuantos.

En el tratamiento de las aguas residuales de la industria textil, los contaminantes orgánicos pueden ser tratados usando reactores de biomasa suspendida o biopelículas, éstos últimos muestran frecuentemente mejor remoción de compuestos xenobióticos (sustancias extrañas a los sistemas biológicos) que los sistemas de biomasa suspendida, ya que se forman nichos especializados donde las bacterias de lento crecimiento degradadoras de contaminantes pueden desarrollarse sin competencia de las bacterias de rápido crecimiento; además, el tiempo de retención por parte del microorganismo en la biopelícula podría ser muy largo, lo cual es una ventaja, y la capa de polisacáridos alrededor de la bacteria protege de inhibiciones por tóxicos. Por lo anterior, los sistemas de biopelículas podrían ser más adecuados para el tratamiento de los colorantes azo (Quezada, et al. 2000). También se ha reportado el uso de sistemas acoplados con biomasa fija aerobio/anaerobio en cuya etapa anaerobia el colorante es biotransformado en aminas aromáticas, las que a su vez son biodegradadas en la etapa aerobia (Cruz y Buitrón, 2000).

La degradación de los colorantes azo dentro de un reactor o en el ambiente puede ser parcial (decoloración) o llegar hasta la mineralización ( $\text{CO}_2$  y agua). La degradación parcial se realiza tanto biótica como abióticamente, mientras que la mineralización se lleva a cabo sólo de manera biótica.

La degradación parcial o decoloración consiste en la reducción del enlace azo y la formación de las respectivas aminas aromáticas. En condiciones aerobias, la biodegradación de compuestos xenobióticos se realiza mediante vías como la de los catecoles y la  $\beta$ -oxidación con la participación de oxigenasas y deshidrogenasas, mientras en condiciones anaerobias, las enzimas involucradas en el metabolismo de xenobióticos son frecuentemente incapaces de catalizar la completa biodegradación de los sustratos y sólo realizan degradaciones parciales. El intervalo de reacciones catabólicas en ambientes anaerobios está restringido a las siguientes reacciones: hidrogenaciones, deshidrogenaciones, hidrataciones, deshidrataciones, hidrólisis, condensaciones, carboxilaciones, descarboxilaciones, reacciones medidas por la coenzima B12 y fotorreacciones. (Adriaens y Hickey, 1994). La tabla 3.4 muestra los diferentes tipos de degradación de los colorantes azo.

**Tabla 3.4 Degradación de colorantes azo**

a) Degradación Química.	<p>La reducción abiótica en ambientes reductores como sedimentos, acuíferos y sitios de desperdicios o desechos peligrosos ha tomado considerable interés recientemente ya que pueden ocurrir reacciones que incluyen deshalogenación reductiva de hidrocarburos polihalogenados, reducción de compuestos aromáticos y azocompuestos. Los reductores naturales más abundantes en dichos ambientes anaerobios se encuentran las formas inorgánicas reducidas de hierro y sulfuro tales como los óxidos de hierro II y III, carbonatos de hierro II y sulfuro de hidrógeno; diversos estudios han comprobado que estos reductores reaccionan con los contaminantes orgánicos a una velocidad muy lenta y dado que tales transformaciones en sistemas naturales son más rápidas, se piensa que en dichos sistemas hay agentes reductores muy reactivos pero poco abundantes que juegan un importante papel como mediadores de transferencia de electrones. La reducción de azocompuestos y compuestos nitroaromáticos hasta las correspondientes anilinas en condiciones anaerobias dependiendo de los valores de pH y <math>E_h</math> del sistema y de los sustituyentes antes presentes en los compuestos. Respecto a los valores de pH y de <math>E_h</math> existe una relación entre éstos y la cantidad de compuestos reducidos en la materia orgánica; la tendencia es que a mayores valores de pH aumenta la cantidad de compuestos reducidos en la materia orgánica y conforme es más negativo el potencial redox (<math>E_h</math>), habrá más componentes de materia orgánica reducidos, los cuales aumentarían la reducción de los compuestos nitroaromáticos. La hidrofobicidad de los compuestos no parece ser un factor determinante aunque se piensa que tal hidrofobicidad puede incrementar la adsorción del compuesto por el sedimento no reactivo de la materia orgánica. En conclusión, se puede mencionar que bajo condiciones redox típicas para la reducción de sulfatos y comunes en ambientes metanogénicos, donde los potenciales de reducción están por debajo de <math>-0.2</math> V, la reducción abiótica de compuestos nitroaromáticos por compuestos reducidos, que forman parte de la materia orgánica natural de diversas fuentes, podría constituir un importante proceso de transformación.</p>
b) Degradación parcial abiótica de colorantes azo en solución diluida de NaClO	<p>Las reacciones de los diferentes colorantes azo con hipoclorito de sodio en agua a un valor de pH=7 han mostrado un marcado efecto de los sustituyentes en el grado de degradación parcial, estando involucrados efectos tanto estéricos como electrónicos. En general, los sustituyentes que aceptan electrones disminuyen los niveles de degradación parcial y los que donan electrones aumentan los niveles.</p>

<p>c) Degradación parcial abiótica de colorantes azo por fotooxidación.</p>	<p>A principios de los ochenta se realizaron estudios que comprobaron la participación del singulete de oxígeno durante la fotooxidación. El grado de fotooxidación del colorante azo es acelerado en presencia de sensibilizadores como azul de metileno y rosa de Bengala, (Kuramoto y Kitao, 1982). La resistencia a la luz de ciertos colorantes depende de la densidad electrónica de los átomos de nitrógeno en el grupo azo y el grado relativo de fotooxidación se incrementa por los sustituyentes donadores de electrones en el anillo arilo.</p>
<p>d) Degradación parcial bioquímica.</p>	<p>Los colorantes azo pueden ser parcialmente reducidos en condiciones anaerobias y aerobias mediante azorreductasas y peroxidasas, respectivamente. La reducción parcial a través de azorreductasas ha sido vinculada con enzimas que transfieren electrones al colorante azo, que actúa como aceptor de electrones inespecífico. (Rafii y Cerniglia, 1995) Con respecto a las peroxidasas, se ha postulado que su capacidad para reducir el enlace azo está relacionada con la similitud estructural del azocompuesto con la lignina. (Paszczynsky, et al. 1992) En relación con la mineralización, ésta rara vez se lleva a cabo en ambientes anaerobios debido a que los colorantes azo actúan como cometabolitos, es decir, se requieren de otra fuente de energía para que éstos sean asimilados, por otra parte, esta bien documentada la mineralización de colorantes azo en condiciones aerobias y sistemas anaerobios-aerobios.</p>
<p>e) Degradación parcial de colorantes azo mediante bacterias en anaerobiosis.</p>	<p>Durante el proceso de reducción biótica en condiciones anaerobias, las bacterias utilizan una gran variedad de aceptores electrónicos, tales como nitrato, sulfato, dióxido de carbono, hierro y magnesio, dependiendo de su disponibilidad y condiciones redox prevalecientes, siendo los potenciales redox y cofactores bioquímicos, (citocromos, corinoides y flavinas) los responsables de la transferencia de electrones. Bajo condiciones anaerobias muchos tipos de bacterias estrictas y facultativas pueden decolorar o degradar parcialmente el colorante azo mediante reductasas o azorreductasas que rompen el enlace azo y forman aminas aromáticas, tales como bencidina, acetilbencidina, etc. dependiendo de la estructura del compuesto azo. Cabe mencionar que la participación de agentes reductores de origen biológico tales como flavinas reducidas son suficientes para la reducción del enlace azo. Se ha observado que la lisis celular acelera la reducción de colorantes, concluyéndose que el grado de reducción está influenciado por la permeabilidad (forma y carga iónica) del azocompuesto (Dubin y Wright, 1975). Recientes investigaciones han revelado que bacterias pertenecientes a los géneros Clostridium y Eubacterium, pueden reducir el enlace azo del colorante azul directo 15 y el grupo nitro de compuestos nitroaromáticos. Este hecho sugiere que los microorganismos capaces de reducir compuestos nitroaromáticos podrían también reducir compuestos nitroaromáticos se encuentran diversas bacterias anaerobias, las cuales realizan la reducción del grupo nitro vía intermediarios nitroso e hidroxiamino hasta generar aminas. (Spain, 1995)</p>
<p>f) Degradación parcial de colorantes azo mediante microorganismos aerobios.</p>	<p>La capacidad para reducir parcialmente colorantes azo en condiciones aerobias ha sido reportada para el género Pseudomonas principalmente. Adicionalmente, se ha reportado la reducción de colorantes azo en extractos celulares de Aeromonas hydrophila, en donde se concluyó que el potencial redox del colorante no tiene una relación directa con la reducción del mismo (Idaka, et al., 1987).</p>
<p>g) Degradación completa en anaerobiosis.</p>	<p>La completa biodegradación o mineralización de los compuestos azo en el ambiente ha sido poco documentada en anaerobiosis, ya que se ha visto que las aminas aromáticas resultantes de la degradación parcial del colorante son generalmente degradadas en aerobiosis, aunque está reportado que algunas de éstas, como los tres isómeros del aminobenzoato 2-aminofenol, 4-aminofenol y el ácido 5-aminosalicílico, son mineralizadas por consorcios metanogénicos. (Razo-Flores, 1997)</p>

<p>h) Degradación completa en sistemas anaerobio-aerobio.</p>	<p>La mineralización de colorantes azo mediante diversos microorganismos o consorcios bacterianos en condiciones que combinan el metabolismo anaerobio para lograr la reducción del colorante y el metabolismo aerobio para la fácil mineralización de los productos de la reducción está ampliamente reportada. En estos sistemas anaerobio-aerobio, se ha logrado la mineralización del colorante Amarillo Mordente 3, en donde la etapa anaerobia generó por reducción las aminas aromáticas 6-aminonaftaleno-2-sulfonato y 5-aminosalicilato. Durante la biodegradación y asimilación como fuente de carbono de compuestos orgánicos aromáticos realizada por el género <i>Pseudomonas</i> intervienen monooxigenasas, dioxigenasas y deshidrogenasas que logran la oxidación y rotura del anillo aromático por la vía de los catecolos. (Gibson y Subramanian, 1984)</p>
<p>i) Degradación completa en aerobiosis.</p>	<p>Después de la reducción del colorante azo en condiciones anaerobias, la mineralización total de las aminas aromáticas se realiza por microorganismos aerobios capaces de romper el anillo aromático y utilizarlo como fuente de carbono, y en casos excepcionales, como fuente de nitrógeno. Por otra parte, está bien establecido que el hongo de pudrición blanca <i>Phanerochaete chrysosporium</i> puede degradar los colorantes azo, desde la etapa de reducción del enlace azo, mediante peroxidasas, hasta su mineralización. (García, 1996; Chao y Lee, 1994)</p>

### 3.4 Tratamiento de lodos residuales

En general las líneas de tratamiento de lodos residuales se encuentran enfocadas a dos aspectos fundamentales que son (Degrémont, 1979):

a) Reducción de volumen: pueden obtenerse por un simple espesamiento (con el que la concentración de sólidos del producto podrá alcanzar, en algunos casos, el 10 o muy excepcionalmente, el 20%, sin que por ello puedan manejarse con pala), por una deshidratación por drenaje natural, escurrido mecánico, secado térmico, o también, y como continuación de una deshidratación, por una incineración.

b) Reducción del poder de fermentación (estabilización) que puede obtenerse mediante procesos como son: digestión anaerobia, estabilización aerobia, estabilización química, pasteurización, cocción, etc. En la figura 3.1 se muestran las líneas de tratamiento más usuales según Degrémont.

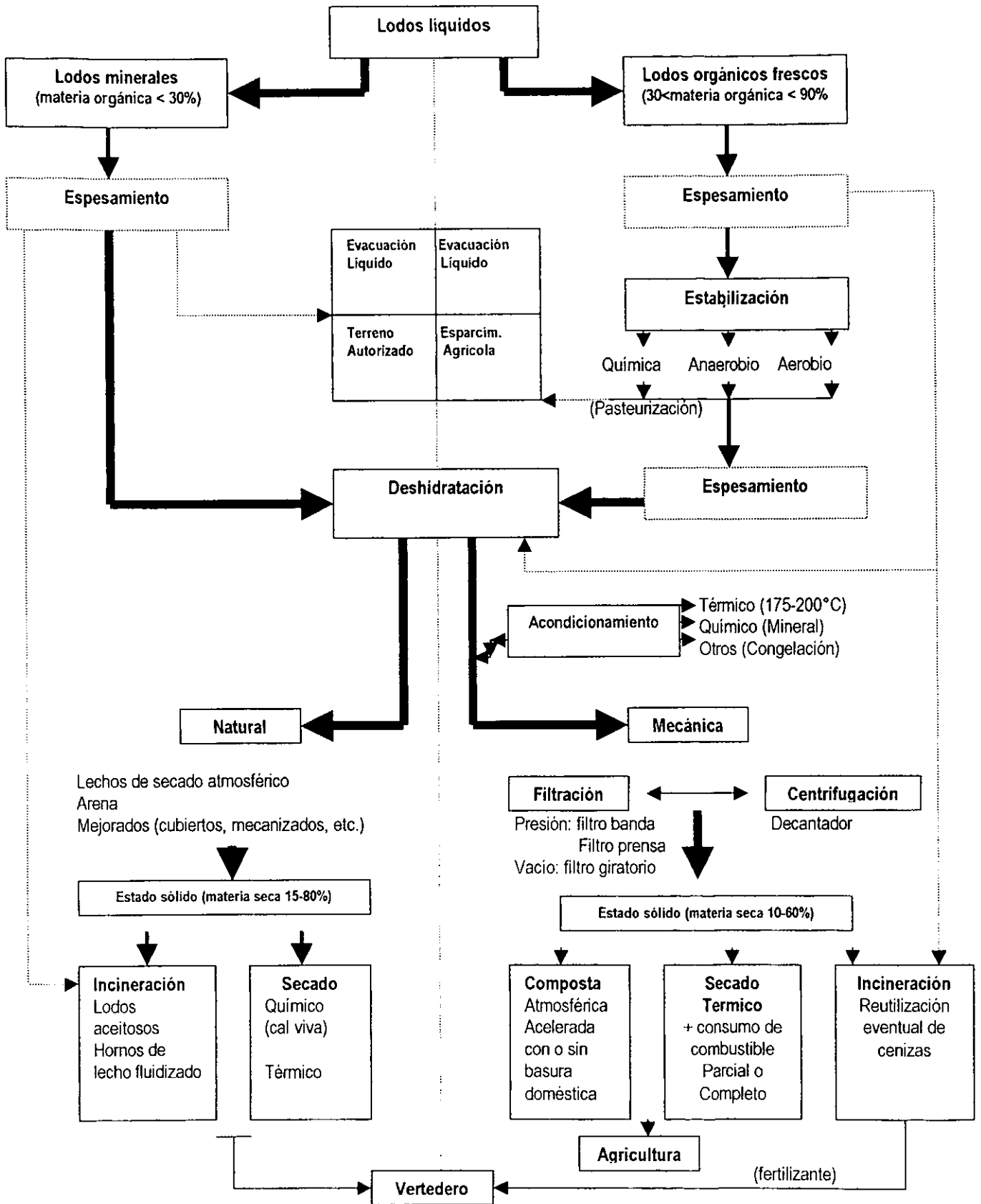


Figura 3.1 Líneas más usuales en el tratamiento de lodos (Dégremont, 1979)

### 3.4.1 Clasificación de lodos residuales

En este sentido existen diferentes formas de clasificar los lodos, ya que dependiendo del enfoque de cada autor se determina el tipo de lodo en función de sus características o su origen y, por lo tanto, se tipifican de distintas maneras, a continuación se presentan algunas clasificaciones de las reportadas en la bibliografía.

#### I. Clasificación de lodos en función de su origen y su contenido de materia coloidal

La caracterización de un lodo es fundamental para la elección de un método de tratamiento adecuado, así como para prever los resultados de los aparatos que han de emplearse. En la tabla 3.5 se propone una clasificación de los diferentes lodos en función de su origen, y de su contenido en materia coloidal hidrófila, que influye activamente en su comportamiento durante la deshidratación (Degrémont, 1979).

a) Clase orgánica hidrófila: es una de las clases más amplias. Las dificultades de deshidratación de estos lodos se deben a la presencia de una fracción importante de coloides hidrófilos. Entran dentro de esta categoría todos los tipos resultantes del tratamiento biológico de aguas residuales, y cuyo contenido en materias volátiles puede alcanzar hasta el 90% de la totalidad de las materias secas (aguas residuales de industrias alimentarias, de química orgánica, por ejemplo).

b) Clase aceitosa: puede ser hidrófobo o hidrófilo y se caracteriza por la presencia, en efluentes, de cantidades incluso pequeñas, de aceites o grasas minerales (o animales). Estos aceites se encuentran en emulsión o adsorbidos por las partículas lodosas hidrófilas o hidrófobas. Pueden contener también una fracción de lodo biológico, en caso de tratamiento final por lodos activados (por ejemplo los derivados de una PTAR de refineries).

c) Clase mineral hidrófila: estos lodos contienen hidróxidos metálicos formados en los procesos fisicoquímicos por precipitación de iones metálicos presentes en el agua a tratar (Al, Fe, Zn, Cr) o debido al empleo de floculantes minerales (sales ferrosas o férricas, sales de aluminio).

Tabla 3.5 Clasificación de lodos por su origen (Degrémont, 1979)

Principal característica del lodo	Origen - Industria	Tratamiento de agua Pretratamiento del lodo	Elementos de composición del lodo
Orgánico hidrófilo	1. PTAR urbanas.	Decantación primaria (primario fresco). Decantación primaria + Digestión anaerobia (primario digerido). Decantación primaria + Biológico + Digestión aerobia (primario y activación de la digestión anaerobia). Aireación prolongada y estabilización aerobia. Fisicoquímico.	Materias orgánicas predominantes. Materias orgánicas/ Materias secas: 30 a 90 %. Materias proteínicas a veces muy fermentables. Residuos vegetales o animales. Aceites y grasas animales y a veces minerales. Hidróxidos hidrófilos (Al, Fe) en tratamiento fisicoquímico. Hidrocarburos (petroquímica).
	2. Aguas residuales de la industrias agrícola y de alimentos. (Cervecerías, Mataderos, Lecherías, Conservas, Establos de ganado).	2. Decantación y Biológico, por tanto: Aireación prolongada, estabilización aerobia o digestión anaerobia.	
	3. Aguas residuales de la industria textil y química orgánica.	3. Fisicoquímico. (floculación-coagulación).	
Aceitoso hidrófilo	1. Agua residual de refinerías. 2. Aguas residuales de talleres mecánicos. (aceites solubles). 3. Aguas residuales de laminadores en frío, metalurgia.	Desaceitado. Floculación-decantación/flotación. Biológico (refinerías).	Aceites y grasas minerales. Hidrocarburos. Hidróxidos (Al, Fe). Material orgánico biológico.
Aceitoso hidrófobo	1. Aguas residuales de laminadores siderúrgicos.	Decantación.	Materia seca y sedimentalbe (casquilla, óxidos de Fe). Aceites y grasas minerales en gran proporción.
Mineral hidrófilo	1. Agua potable de río o pozo y aportación industrial (Clarificación, Descarbonatación, Efluentes de desmineralización). 2. Aguas residuales de tratamiento de superficies metálicas (Decapado, Anodizado, Galvanoplastia, Pintura). 3. Aguas residuales de la industria química mineral. 4. Aguas residuales de colorantes y tintes 5. Aguas residuales de curtidurías.	1. Fisicoquímico (floculación-coagulación), Neutralización de efluentes. 2. Neutralización + floculación-decantación. Eliminación de constituyentes tóxicos (cianuros, Cr <sup>6+</sup> ) + floculación decantación. 3. Fisicoquímico + Neutralización. 4. Fisicoquímico + Biológico. 5. Fisicoquímico + Biológico.	Predominio de hidróxidos metálicos hidrófilos (Fe, Al, Cr...). + materias orgánicas (< 30% sobre materias secas) + CaCO <sub>3</sub> (descarbonatación) o CaSO <sub>4</sub> 2H <sub>2</sub> O. (neutralización H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ).  4. Mineral + orgánico. 5. Mineral + orgánico + grasa animal y materias orgánicas.
Mineral hidrófobo	1. Aportación industrial (descarbonatación) 2. Siderurgia (fundición y lavado de gases). 3. Lavado de gases.	Neutralización Floculación y Decantación	Materias minerales densas. Pequeño contenido de hidróxidos hidrófilos (Fe, Al, Mg > 5% sobre materia seca). Pequeño contenido de materia orgánica (< 5% sobre materia seca)
Fibroso	1. Agua residual de la industria de celulosa y papel.	Decantación y flotación (recuperación de fibras). Floculación - decantación. Biológico (eventual).	Fibras celulósicas + eventualmente aserrín y virutas + hidróxidos hidrófilos (contenido más o menos importante) + materias orgánicas biológicas eventuales.



d) Clase mineral hidrófoba: estos lodos se caracterizan por una gran proporción de materias con un contenido en agua mínimo (arena, limo, escoria, cascarilla, sales cristalizadas, etc.). La deshidratación de este tipo de lodos que en principio, no presenta dificultad, puede verse perturbada por la presencia de materias minerales hidrófilas, procedentes de floculantes utilizados en el proceso de tratamiento de agua.

e) Clase fibrosa: estos lodos son, generalmente, fáciles de deshidratar, excepto en el caso de que, debido a una recuperación extremada de fibras, evolucionen hacia el tipo hidrófilo, por la presencia de hidróxidos o de lodos biológicos, o de ambos.

## II. Clasificación de lodos industriales

La generación de lodos industriales en procesos de producción es común, sobre todo en los siguientes tipos de industrias: textil, química y farmacéutica, pulpa y producción de papel, metalmecánica y acabado de metal, industria de electrolgalvanizado, electrónicas, procesamiento de alimentos, curtido del cuero, etc. Estos tipos de lodos pueden ser clasificados en función de la toxicidad y la prioridad de manejo teniendo los siguientes tipos de lodos industriales. La tabla 3.6 muestra los diferentes tipos de lodos según CEPIS-REPAMAR, 1999.

**Tabla 3.6 Tipos de lodo y prioridad de manejo (CEPIS-REPAMAR, 1999)**

Tipo de lodo	Prioridad de manejo
a) Lodos orgánicos con bajas concentraciones de contaminantes tóxicos, fácilmente biodegradable.	I Reuso como fertilizante dependiendo de la composición, prevención dependiendo del proceso de generación, relleno sanitario o incineración.
b) Lodos orgánicos e inorgánicos con bajas concentraciones de contaminantes tóxicos, los orgánicos no fácilmente biodegradables.	II Reuso y revalorización dependiendo de la composición, compostaje, incineración o relleno.
c) Lodos orgánicos e inorgánicos contenido de contaminantes tóxicos, prioridad III.	III Prevención dependiendo de los procesos de generación del lodo o disposición en rellenos.

Según la NOM-052 los lodos de la Industria textil se encuentran clasificados dentro de la prioridad III, sin embargo, en el resultado del análisis CRETIB (anexo I) presentados en este trabajo se ubica dentro de prioridad II.

### III. Clasificación de lodos en función de diferentes parámetros

Como se muestra en la tabla 3.7 los lodos también pueden ser clasificados de acuerdo a su contenido de agua, su origen, su composición química, etc. (<http://www.promptuarium.org/ciclo.htm>)

**Tabla 3.7 Clasificación de lodos en función de distintos parámetros**  
(<http://www.proptuarium.org/ciclo.htm>)

Parámetro de clasificación	Tipo de lodo
Por su contenido de agua	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Lodos líquidos: cuyo contenido de agua es superior al 80%.</li> <li>2. Lodos plásticos o paleables: su contenido en agua es inferior al 80%, por lo que pueden ser manejados mediante pala y transportados en camiones de caja abierta.</li> <li>3. Lodos sólidos: cuyo contenido de agua es inferior al 60%.</li> </ol>
Por su composición química	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Lodos orgánicos.</li> <li>2. Lodos inorgánicos.</li> <li>3. Lodos tóxicos y peligrosos.</li> </ol>
Por su origen	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Arena y detritos.</li> <li>2. Lodos primarios.</li> <li>3. Lodos secundarios.</li> </ol>
Por su contenido de sólidos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Lodos en sedimentación libre: frescos, espesados o digeridos húmedos.</li> <li>2. Lodos de precipitación química: frescos o digeridos húmedos.</li> <li>3. Lodos de filtración: frescos, espesados sedimentados o digeridos húmedos.</li> <li>4. Lodos activados: frescos o espesados.</li> <li>5. Lodos digeridos húmedos.</li> </ol>
Por su destino final	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Lodos incinerables.</li> <li>2. Lodos agrícolas.</li> <li>3. Lodos para vertido controlado.</li> <li>4. Lodos para confinamiento controlado.</li> </ol>

#### 3.4.2 Espesamiento de lodos

El espesamiento de lodos es la primera fase y la más simple de la reducción del volumen de los lodos sin gran consumo de energía y consiste en aumentar la concentración de sólidos en los lodos residuales. El interés principal del espesamiento es reducir el volumen de los equipos de estabilización y acondicionamiento (Degrémont, 1979).

La concentración de sólidos totales en los lodos se duplica aproximadamente en el espesamiento, que se conoce también como consolidación. El aumento en la concentración depende el tipo de lodos, teniendo los lodos activados un aumento de hasta 3% de sólidos totales y los lodos primarios

hasta cerca del 9%. Los métodos más usuales para el espesamiento se muestran en la tabla 3.8 (Degrémont, 1979; Winkler, 1998):

**Tabla 3.8 Métodos de espesamiento de lodos (Degrémont, 1979; Winkler, 1998)**

Espesamiento por gravedad	La suspensión de lodos se introduce en un depósito (espesador) con un tiempo de permanencia elevado, en el que se produce el asentamiento de lodo sobre si mismo, efectuándose su extracción por el fondo mientras que el líquido intersticial se evacúa por la parte superior (espesadores mecanizados, con y sin barrido).
Espesamiento por flotación	Obtención, con lodos coloidales concentraciones superiores a las obtenidas por espesamiento estático. La flotación se ha utilizado hasta ahora, especialmente para el espesamiento de lodos activados y la recuperación de fibras celulósicas pero puede aplicarse igualmente a lodos minerales hidrófilos formados por floculos de pequeña densidad.
Espesamiento con elutriación	Consiste en un lavado de lodos con agua clara, con el fin de mejorar las características físicas o químicas de la suspensión de lodos: a) eliminación de materias coloidales y finas y b) la reducción de la alcalinidad (lodo digerido anaerobio urbano). La eliminación de materias finas, acelera el espesamiento de lodos e incrementa la producción de los sistemas de secado mecánico (filtro al vacío, filtro-prensa, centrifugadora, etc.).

### 3.4.3 Estabilización de lodos

La estabilización de lodos consiste en reducir su actividad biológica y la tendencia a la putrefacción y su contenido de microorganismos causantes de enfermedades. Por lo general la estabilización se realiza biológicamente, por digestión, pero se pueden utilizar también métodos químicos. La digestión reduce el contenido de materia orgánica y elimina olores desagradables; se puede efectuar de manera aerobia o anaerobia. Como los lodos son efectivamente un líquido rico en nutrientes, ambos tipos de digestión pueden ser aplicados considerando las características del lodo (Winkler, 1998).

#### 3.4.3.1 Estabilización aerobia de lodos

La digestión aerobia se puede considerar fundamentalmente como un proceso de aireación prolongada. Implica un largo período de aireación de los lodos activados en un tanque, con un tiempo de retención de aproximadamente 20 días a la temperatura ambiente. El mecanismo consiste en una aireación prolongada de los lodos para provocar, el desarrollo de microorganismos aerobios,

hasta sobrepasar el período de síntesis de las células y llevado a cabo su propia autooxidación, lo que se conoce como fase endógena, esquematizado en una primera etapa, por la eliminación de materia celular.



Posteriormente el  $NH_3$ , se oxida biológicamente a  $NO_3^-$ .

El consumo de energía del proceso es alto y los lodos digeridos resultan difíciles de espesar ya que los sólidos no se asientan fácilmente. En 20 días de aireación el contenido de sólidos suspendidos totales se reduce en aproximadamente 30% y puede requerirse un período de 90 días para efectuar una reducción del 60%. Se puede obtener la estabilización aerobia a una temperatura más alta rociando, con oxígeno de alta pureza en lugar de aire. En un tanque bien aislado, el calor liberado por la oxidación de los sólidos en los lodos, es suficiente para mantenerlos a una temperatura de más de 50°C, lo que no sólo aumenta la tasa de reacción sino que efectúa también una esterilización parcial de los mismos y reduce el número de microorganismos patógenos. El largo período de aireación requerido hace que la digestión aerobia sea costosa en términos de la energía, pero el equipo necesario es más simple que el utilizado en la digestión anaerobia. Las bacterias aerobias trabajan más rápidamente que las metanogénicas, sin embargo, la parte no biodegradable de las células es relativamente mayor en una estabilización aerobia, en la tabla 3.9 se muestran los parámetros determinantes de de la digestión aerobia de lodos (Winkler, 1998; Fair, 1999).

**Tabla 3.9 Parámetros determinantes en la digestión aerobia de lodos (Winkler,1998; Fair,1999)**

i) Parámetros de calidad	a) El olor de los lodos de digestión b) Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) c) Demanda química de oxígeno (DQO) d) Sólidos suspendidos totales (SST)
ii) Parámetros de control	Los parámetros de control son aquellos utilizados para favorecer el desarrollo de microorganismos que permitan la estabilización de lodos llevándolos a un producto estable: a) Oxígeno disuelto (OD), relacionado de manera inversa con la temperatura del lodo, determinando las cantidades a suministrar de oxígeno y consecuentemente los gastos energéticos. b) El volumen del reactor debe ser capaz de retener las materias el tiempo de permanencia necesario para obtener el nivel de degradación deseado. c) El pH (6.5-7.5) d) La concentración elevada de lodos. Es muy conveniente alimentar el digestor con lodos tan espesos como sea posible, por dos razones:

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para obtener un tiempo de permanencia correspondiente a un rendimiento dado, puede reducirse el volumen y, por tanto, el precio del digestor.</li> <li>• La velocidad de destrucción de células disminuye cuando la relación alimentación/microorganismos disminuye, manteniendo el sistema en mejores condiciones.</li> </ul>
iii) Producción de gases	Durante la digestión aerobia de lodos se liberan como productos dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) y amoníaco (NH <sub>3</sub> ) e hidrógeno (H <sub>2</sub> ), además es importante señalar que las corrientes de aire pueden arrastrar microorganismos patógenos en los aerosoles.
iv) Variación de temperatura	La estabilización aerobia, está fuertemente influenciada por la temperatura, y el paso de 20°C a 10°C puede producir un aumento del 50% del tiempo de estabilización para un porcentaje igual de reducción de materias volátiles. Sin embargo, esta reducción de la eficiencia debida a una caída de temperatura, no produce las graves molestias originadas en las mismas condiciones en una digestión anaerobia sin calentamiento: olores nauseabundos, lodos grises que drenan mal, pH ácido, etc.
v) Ventajas de la digestión aerobia	Puesto que se trata de un proceso más flexible que la digestión anaerobia en la cual las bacterias metanogénicas son sensibles a las condiciones (presencia de Cr <sup>6+</sup> y cationes de metales pesados), la estabilización aerobia se adapta muy bien al tratamiento de lodos de aguas residuales industriales. Requiere durante su explotación, gastos de energía superiores a los correspondientes a la digestión anaerobia, mientras que por el contrario, esta última es más costosa en gastos de instalación.

### 3.4.3.2 Estabilización anaerobia de lodos

La digestión anaerobia tiene un poder de destrucción celular de los más potentes del mundo biológico, y permite la eliminación de una cantidad muy fuerte de materias orgánicas. La digestión anaerobia comprende dos fases: una fase de licuación y otra de gasificación. La fase de licuación da lugar, esencialmente a la producción de ácidos volátiles. En la fase de gasificación, las bacterias metogénicas estrictamente anaerobias producen gas metano a partir de ácidos volátiles o de alcoholes formados en un rango de pH (actividad máxima entre 6.8 y 7.2). Una producción alta de ácidos volátiles da lugar a un descenso de pH que frena la actividad biológica de la digestión. Los lodos digeridos tienen un color negro (sulfato de hierro) y huelen a brea. No pueden distinguirse prácticamente sus constituyentes iniciales (a excepción de pelos y algunas semillas). La mayor parte de los microorganismos patógenos se encuentra eliminada y el poder bactericida es muy fuerte. En este tipo de digestión son parámetros importantes la temperatura, el volumen del reactor, la concentración elevada de los lodos, la intensidad de la agitación, la regularidad de la alimentación. Los factores que inhiben la digestión son: metales como Cu, Ni, Zn, exceso de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, sulfuros, cianuros, fenoles, ftalatos y una concentración excesiva de detergentes. La digestión de las materias orgánicas se efectúa, generalmente, con la participación de bacterias mesófilas que mantienen su

actividad óptima a 37°C, también deben revisarse los siguientes puntos, para el buen funcionamiento del sistema:

- a) Los ácidos volátiles (acético, propiónico, butírico) en equilibrio con sus sales (expresadas en forma de CH<sub>3</sub>COOH).
- b) El ácido carbónico y su sal: los bicarbonatos (expresados en forma de CaCO<sub>3</sub>).
- c) El amoníaco.

A un pH dado y una concentración determinada un ácido volátil, existe una relación entre el ácido y su sal. Igualmente, para un contenido dado en CO<sub>2</sub> total, hay un equilibrio entre el ácido libre y el bicarbonato. A un pH próximo a 7, índice de una buena digestión, puede considerarse, en primera aproximación, que todos los ácidos volátiles se encuentran en forma de sales (en parte, amoniacales). La tabla 3.10 muestra los parámetros determinantes en la digestión anaerobia de lodos. (Degrémont, 1979; Fair, 1999).

**Tabla 3.10 Parámetros determinantes en la digestión anaerobia de lodos (Degrémont, 1979; Fair, 1999)**

i) Parámetros de calidad	<p>Los parámetros de calidad expresan la remoción de contaminantes o bien de materia orgánica eliminada durante el proceso de digestión de lodos.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) La producción de biogás y su composición</li> <li>b) Los ácidos volátiles</li> <li>c) El olor de los lodos de digestión</li> <li>d) Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)</li> <li>e) Demanda química de oxígeno (DQO)</li> <li>f) Sólidos suspendidos totales (SST)</li> </ul>
ii) Parámetros de control	<p>Los parámetros favorables al desarrollo estable y completo de la digestión anaerobia son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) La temperatura de la masa de lodo, que debe ser suficiente y lo más constante posible.</li> <li>b) El volumen del reactor, que debe ser capaz de retener las materias el tiempo de permanencia necesario para obtener el nivel de degradación deseado.</li> <li>c) El pH</li> <li>d) La alcalinidad</li> <li>e) La concentración elevada de lodos. Es muy conveniente alimentar el digestor con lodos tan espesos como sea posible, por dos razones esenciales: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Para un tiempo de permanencia correspondiente a un rendimiento dado, puede reducirse el volumen y por tanto, el precio del digestor.</li> <li>• La concentración en bacterias metanogénicas aumenta; se acelera el desarrollo de la reacción bioquímica, facilitándose en especial su puesta en marcha.</li> </ul> </li> <li>f) La intensidad de la agitación. Está multiplica las posibilidades de encuentro de los microorganismos con las materias a degradar y homogeneiza la masa de lodos. La diferencia que puede existir entre el rendimiento de digestión en un tanque a nivel laboratorio de pequeño volumen, y el de una instalación industrial, se explica por la agitación mucho más</li> </ul>

	<p>intensa, realizada sin dificultad, en un tanque de pequeñas dimensiones. Una agitación potente y eficaz evita variaciones de temperatura o de concentración en materias orgánicas (lodos frescos y lodos en digestión) entre las distintas zonas del digestor.</p> <p>g) La regularidad de la alimentación. La aportación de lodos frescos y la extracción de lodos digeridos deben regularse de forma que se mantenga una relación materias orgánicas/microorganismos, lo más constante posible, para evitar así toda parada repentina en el desarrollo de microorganismos.</p> <p>Los principales factores inhibidores o perturbadores de la digestión son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La presencia de ciertos compuestos tóxicos: cationes pesados (Cu, Ni, Zn), exceso de iones (<math>\text{NH}_4^+</math>), sulfuros, algunos compuestos orgánicos (fenoles, cianuros, ftalatos, etc), concentración excesiva de detergentes.</li> <li>• Las variaciones bruscas de pH fuera de la zona óptima (6.8 a 7.2) debidas a aportaciones de soluciones alcalinas o ácidas.</li> <li>• Toda variación fuerte de las condiciones de temperatura y de carga</li> </ul>
<p>iii) Producción de biogás</p>	<p>El gas producido se compone esencialmente de metano <math>\text{CH}_4</math> y gas carbónico <math>\text{CO}_2</math>, en las proporciones siguientes en volumen: <math>\text{CH}_4</math> de un 65 a 70 % y <math>\text{CO}_2</math> de un 25 a 30%.</p> <p>Pueden encontrarse otros elementos en pequeña proporción: oxígeno <math>\text{O}_2</math> (0 a 0.3%), monóxido de carbono <math>\text{CO}</math> (2 a 4%), nitrógeno <math>\text{N}_2</math> (1%), hidrocarburos (0 a 1.5%), sulfuro de hidrógeno <math>\text{H}_2\text{S}</math>.</p> <p>La producción de gas es el criterio más representativo de la calidad de la digestión y depende esencialmente de dos factores: la temperatura y tiempo de permanencia.</p> <p>La influencia de la temperatura es determinante para el buen funcionamiento de una digestión: rapidez de puesta en marcha, estabilidad de la fermentación, producción de gas.</p> <p>El tiempo de permanencia depende de la velocidad de reproducción de microorganismos, pudiendo fijarse un umbral teórico de duración de la digestión hacia los 3 ó 4 días. Por debajo de este valor, el empobrecimiento en microorganismos, debido al caudal de lodos evacuados del digestor, es más rápido que el desarrollo de nuevas bacterias debidas a la transformación de las materias aportadas.</p> <p>El poder calorífico inferior (PCI) del gas de digestión está comprendido entre 5,400 y 6,000 <math>\text{kcal/m}^3</math>. Este poder calorífico varía con la proporción de metano, estando generalmente en relación con la velocidad de digestión (el PCI aumenta con una digestión más lenta).</p>
<p>iv) Variación de la temperatura</p>	<p>En la digestión anaerobia se utilizan tres rangos de temperatura: digestión fría por debajo de <math>20^\circ\text{C}</math>, digestión mesofílica entre <math>20^\circ\text{C}</math> y <math>40^\circ\text{C}</math> y termofílica por encima de <math>40^\circ\text{C}</math> y hasta aproximadamente <math>55^\circ\text{C}</math>. Como las tasas de reacción biológica aumentan con la temperatura, la digestión en frío requiere tiempos de retención más largos que los de la digestión mesofílica más usual. Para mantener temperaturas de digestión más elevadas, se utiliza con frecuencia el metano producido o en procesos industriales, se puede utilizar el calor residual en el agua de enfriamiento del proceso.</p>
<p>v) Ventajas de la digestión anaerobia</p>	<p>La mayor parte de los gérmenes patógenos se encuentra eliminada y el poder bactericida de la digestión alcalina es muy fuerte (sin embargo, es discutida la destrucción de ciertos virus)</p> <p>La digestión anaerobia presenta la ventaja de suministrar energía en forma de un producto noble: gas metano, el cual puede almacenarse fácilmente en gasómeros de campana o en esferas a presión.</p>

### 3.4.3.3 Comparación de las características de los procesos aerobio y anaerobio

Debido a la mayor energía calorífica desprendida en la oxidación, las bacterias aerobias trabajan más rápidamente que las bacterias metanogénicas. Sin embargo, la parte no biodegradable de las células es relativamente mayor en una estabilización aerobia. La tabla 3.11 resume las características de los dos procedimientos:

**Tabla 3.11 Características de la digestión aerobia y anaerobia de lodos (Degrémont, 1979)**

Características	Estabilización aerobia	Estabilización anaerobia
Productos de degradación	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , H <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub>
Energía disponible para las bacterias (para 1 mol de dextrosa)	650 cal	35 cal
Velocidad de degradación	+	-
Reducción final de materias volátiles	-	+
DBO <sub>5</sub> del líquido sobrenadante	50-500 mgL <sup>-1</sup>	500-3000 mgL <sup>-1</sup>
Filtrabilidad	-	+

La reducción de materias volátiles que se obtienen por medio de la estabilización aerobia, en las condiciones climatológicas más frecuentes, es sensiblemente inferior a la conseguida por digestión anaerobia con calentamiento. La eliminación de gérmenes patógenos es, igualmente, menos eficaz (del orden del 85%) y la destrucción de los huevos de gusanos más problemática (Winkler, 1998).

Sin embargo, debido a la sencillez del proceso a su facilidad de soportar variaciones de carga, de pH y aun, dentro de cierta medida, de temperatura, la estabilización de los lodos es un procedimiento que se ha extendido considerablemente.

### 3.4.3.4 Otros métodos de digestión

a) Vermicomposteo: El vermicomposteo es una tecnología de bajo costo destinada a la estabilización de los residuos orgánicos que aprovecha la capacidad detritivora de las lombrices rojas californianas. Los lodos residuales de la industria papelera, de difícil gestión por su elevado volumen de producción y compleja biodegradabilidad, pueden transformarse mediante estos sistemas. Las lombrices aceleran los procesos de degradación y humificación de estos lodos, y la vermicomposta obtenida se utiliza como abono en agricultura y jardinería.

Las lombrices rojas californianas son un grupo de invertebrados caracterizados por su sencillo diseño estructural, con intercambio gaseoso a través de la superficie corporal húmeda y limitados



mecanismos de control del equilibrio osmótico, así como por el activo papel que desempeñan en la incorporación y transformación de la materia orgánica en los suelos.

Las ventajas que estos organismos ofrecen como componente fundamental de la comunidad edáfica, han sido enfocadas hacia varios usos prácticos dirigidos a la protección y mejora del medio ambiente (restauración de suelos empobrecidos, mejoras agrícolas, etc.).  
(<http://www.emison.com/143.HTM>)

b) Estabilización química de los lodos: La aportación de reactivos no modifica la cantidad de materias orgánicas biodegradables, sino que realiza esencialmente la acción bactericida. Por su reducido costo y por su alcalinidad, la cal es el reactivo que más se utiliza. En el caso de lodos líquidos, la adición de cal eleva el pH, llevando al bloqueo temporal de fermentaciones ácidas. Su empleo es frecuente en espesadores de lodos, especialmente de lodos frescos con lo que también se mejora la filtrabilidad inicial del lodo. Las dosis de cal utilizadas para lodos frescos son del orden del 10% de la cantidad de materia seca, variando con la septicidad del agua bruta, el tipo de tratamiento del agua, la temperatura y el espesamiento. Sin embargo, aún cuando se añada cal, no podrá prolongarse excesivamente el tiempo de almacenamiento de lodos líquidos, debido al efecto de dilución y a que a la larga se reanudara la fermentación. En el caso de lodos deshidratados, la estabilización con cal es mucho más duradera, puesto que en tal caso, las fermentaciones ácidas se desarrollan con gran dificultad. Mediante el empleo de cal viva, puede aprovecharse el efecto exotérmico de la reacción de hidratación para aumentar la sequedad del lodo. Con un almacenamiento completamente al aire libre, se consigue una reducción adicional del número de microorganismos patógenos, especialmente cuando la deshidratación de los lodos se ha realizado en presencia de antisépticos. Con pH superior a 11 se lleva el contenido de coliformes hasta unos valores próximos a  $10^3$  germenes /g (contra  $10^9$  en caso de no adicionar reactivo). Otros oxidantes pueden ser el  $\text{Cl}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$  (Metcalf&Edy, 1991).

c) Pasteurización: Este método asegura un lodo aséptico, de forma que pueda emplearse sin peligro, en estado líquido, con fines agrícolas, incluso en cultivos forrajeros o leguminosos. Consiste en mantener el lodo a una temperatura de  $70^\circ\text{C}$  durante 20 min. Este tratamiento se realiza con lodo líquido bruto, espesado o no; parece que de esta forma, se destruyen igualmente los virus. En el caso de lodos frescos, no se elimina totalmente el peligro de que se produzcan fermentaciones en los lodos esparcidos (Degrémont, 1979).

### 3.4.4 Acondicionamiento de lodos

Una vez espesados y estabilizados, los lodos contienen aún una cantidad muy elevada de agua: 97 a 98% si las materias secas son altamente orgánicas y en especial, de naturaleza protídica; 70 a 80% si estas son minerales, pesadas y granulosas. Para conseguir lodos transportables o manejables con palas, es necesario recurrir a una deshidratación complementaria. Frecuentemente se presentan dificultades en la reducción de volumen ligadas íntimamente a la masa coloidal, de naturaleza hidrófila (hidrófoba) de la que están compuestas gran parte de las suspensiones lodosas. El tratamiento de los lodos para aumentar su susceptibilidad a la concentración se conoce como acondicionamiento de lodos. Se puede mejorar la capacidad de asentamiento de los lodos por la adición de tierra, iones orgánicos polivalentes como el Fe III o el Al III, o polielectrólitos. Estos últimos, a pesar de ser comparativamente más costosos, son efectivos a concentraciones muy bajas como el 0.01% de los lodos. En la tabla 3.12 se presentan algunos métodos de acondicionamiento utilizados.

**Tabla 3.12 Métodos de acondicionamiento de lodos (Fair, 1999)**

Acondicionamiento químico	El acondicionamiento químico conduce a la aplicación de fenómenos de coagulación y floculación (para modificar las fuerzas de cohesión interna del lodo, al romper la estabilidad coloidal, aumentar artificialmente el tamaño de las partículas y liberar partículas de agua), los reactivos que se utilizan son de origen mineral u orgánico. Las sales metálicas más eficaces y económicas son: cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), sulfato férrico: ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ), clorosulfato férrico ( $\text{FeSO}_4\text{Cl}$ ), sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4$ ), y en menor grado las sales de alumnio.
Acondicionamiento térmico	La ruptura de los enlaces de agua y de la materia coloidal puede obtenerse, igualmente, por vía térmica: ya sea por elevación de temperatura o por descenso de la temperatura. El calentamiento de un lodo a una temperatura suficiente si contiene gran proporción de materias orgánicas (y coloidales). La temperatura de cocción adoptada varía entre 160 y 210 °C, y el tiempo de la operación entre 30 y 60 min. Según el tipo de lodo a tratar y el sistema de secado posterior. Durante la cocción, se destruyen los geles coloidales.
Congelación	La solidificación total del lodo por congelación durante un tiempo suficiente reduce la cantidad de agua asociada a la materia y como consecuencia agrupa las partículas. Este agrupamiento se efectúa en forma de laminillas finas, que se mantienen relativamente estables después de la fusión del hielo. La congelación se efectúa a temperaturas del orden de -10 a -20 °C y durante un tiempo de 1 a 4h.
Deshidratación	El secado de lodos por filtración es el sistema de deshidratación más utilizado hasta ahora en el tratamiento de lodos procedentes de la depuración de agua. Esta filtración puede consistir en un simple drenaje sobre lechos de arena o en una filtración mecánica al vacío o, a presión utilizando materiales más elaborados.
Lechos de secado	El secado de lodos sobre lechos de arena drenados ha sido la técnica más utilizada; se usa en instalaciones pequeñas a pesar de su gran exigencia de terreno y mano de obra y en instalaciones grandes cuando las condiciones climatológicas son muy favorables y solo debe preverse en el caso de lodos bien estabilizados y no putrescibles.

Sacos Filtrantes	En instalaciones pequeñas, pueden utilizarse sacos filtrantes, de diseño simple y escasas exigencias, para facilitar la descarga o esparcimiento. El lodo floculado por polielectrólitos se carga en sacos de tejido sintético provistos de una columna central suplementaria de drenaje.
Filtración al vacío	Es el procedimiento más antiguo de deshidratación mecánica, estos filtros son del tipo de tambor rotatorio o de canal abierto, en algunos casos, pueden usarse otros tipos ya sea con bandas horizontales y filtros de papel.
Filtración a presión	Generalmente se usan prensas continuas de tornillo
Centrifugación	Los sólidos del lodo se compactan, por fuerza centrífuga, contra la pared interior de la cuba rotativa, siendo luego arrastrados por un transportador hacia la salida.

### 3.4.5 Secado e incineración

a) Secado: Término que generalmente se reserva al secado térmico, consistente en evacuar, por evaporación, el agua intersticial presente en los lodos. En el caso de un secado total, el producto final se reduce prácticamente sólo a materias secas, orgánicas y minerales. (Degrémont, 1979)

b) Incineración: Conduce no sólo a la eliminación del agua intersticial, sino igualmente a la combustión de materias orgánicas de los lodos. Es el proceso con el que se consigue un producto residual de menor masa las cenizas constituidas únicamente por las materias minerales del lodo. (Degrémont, 1979)

### 3.5 Tendencias de las nuevas tecnologías en el tratamiento de lodos

Las tendencias en el tratamiento de lodos están enfocadas a la aplicación de nuevas tecnologías con la finalidad de alcanzar una mayor reducción en el volumen de lodos, así como una mejor oxidación que permita la reutilización del producto, con mayores eficiencias. La tabla 3.13 muestra algunos de los nuevos procesos reportados para la estabilización de lodos. (<http://www.promptuarium.org/ciclo.htm>)

**Tabla 3.13 Nuevas tecnologías en el tratamiento de lodos**  
 (<http://www.promptuarium.org/ciclo.htm>)

<i>Proceso EXERGY</i>	Tiende a la reducción de volumen de lodos, alcanzándose una reducción de hasta el 75%, utilizando un reactor cerrado con tres fases de aire sobrecalentado. Siendo su aspecto más destacable su eficiencia energética, que llega al 80%.
<i>Proceso CARVER-GREENFIELD</i>	Utiliza aceite como fluido de transporte del lodo aplicando un procedimiento de secado multietapa.
<i>Proceso SSP (ondas de choque de plasma)</i>	Mediante un campo eléctrico de alto voltaje consigue altísimas temperaturas, oxidando a continuación el lodo en dos fases y con exceso de aire. La ventaja de este sistema es la fácil reutilización de los subproductos.
<i>Proceso OFS</i>	Que permite la producción, a partir de lodos secos, mediante su calentamiento y favoreciendo las reacciones catalíticas, aceites similares a los aceites diesel.
<i>Sistema VERTECH</i>	Basado en la oxidación orgánica de los contaminantes ayudada por la aplicación de oxígeno a altas temperaturas
<i>Proceso EAD</i>	Basado la aplicación de un campo sónico y corriente eléctrica, en la actualidad de encuentra en fase experimental

## **CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA**

En este capítulo se explica la metodología seguida para llegar a los objetivos planteados, se describe de manera general el origen de los lodos utilizados, el muestreo, las técnicas de análisis, las características y estabilización de los reactores, así como los parámetros de control y los de calidad.

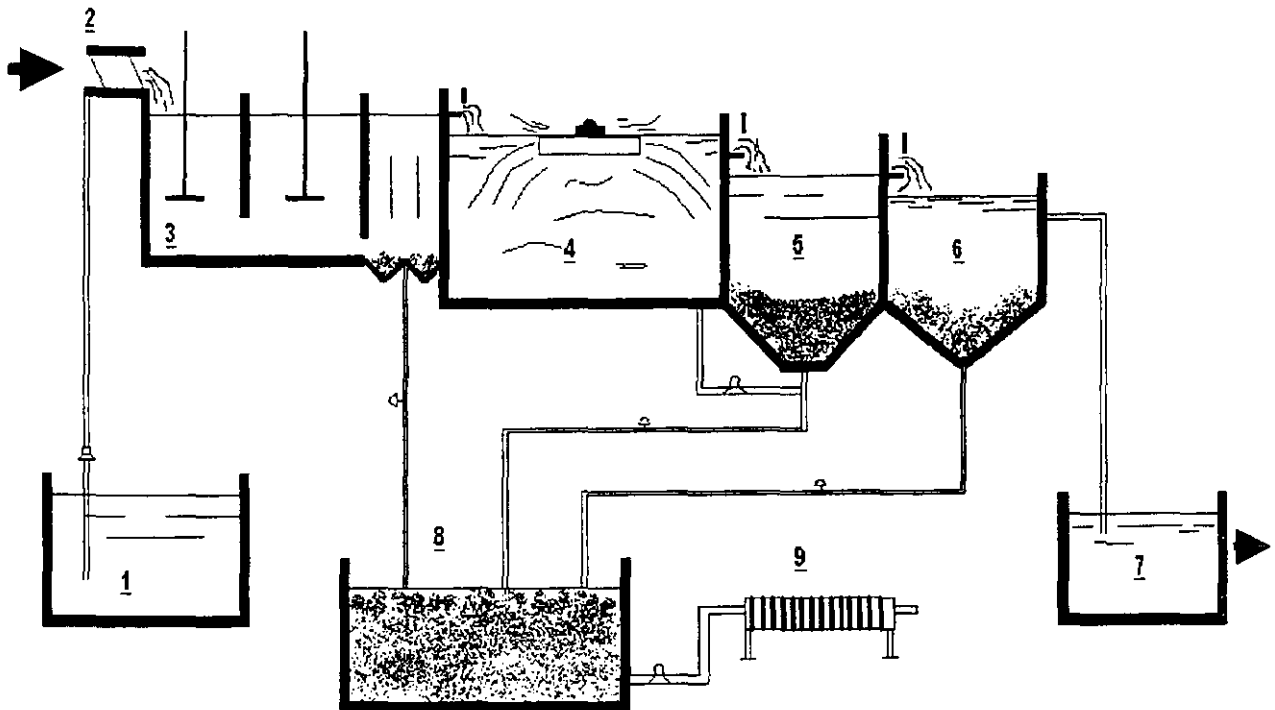
### **4.1 Origen de los lodos**

Los lodos utilizados fueron proporcionados por una planta de tratamiento de aguas residuales de la industria textil ubicada al sur de la Cd. de México, esta industria se dedica a la producción de hilos sintéticos y de algodón y sus mezclas, los procesos usados en la elaboración del producto son muy semejantes a los descritos en sección 2.2. Para entender la naturaleza de los lodos se describen a continuación brevemente las unidades que integran el tratamiento de los efluentes líquidos.

La planta trabaja con un gasto de 6 l/s, el sistema de tratamiento esta integrado de la siguiente manera: 1) Tanque de homogenización, 2) cribado, 3) tanque de coagulación-floculación, 4) sistema de lodos activados, 5) sedimentador primario, 6) clarificador, 7) cárcamo de bombeo de agua tratada y 8) cárcamo de lodos, como se muestra en la figura 4.1.

#### **1) Tanque de igualación**

En esta unidad se amortiguan las variaciones de caudal, así como las de concentración de los parámetros importantes en el tratamiento, con la finalidad de conseguir un caudal constante eliminando así problemas en el proceso de tratamiento y mejorando el funcionamiento del sistema de lodos activados, reduciendo cargas de choque y diluyendo las sustancias inhibitorias, con lo cual se mejora la calidad del efluente y el rendimiento de los tanques de sedimentación secundaria, al trabajar con cargas de sólidos constantes, esto permite el amortiguamiento de las cargas aplicadas mejora el control de la dosificación de los reactivos y la fiabilidad del proceso.



- |  |                             |
|--|-----------------------------|
| 1 Tanque de homogenización             | 2. Cribado                  |
| 3. Tanque de coagulación – floculación | 4. Sistema de lodos activos |
| 5. Sedimentador primario               | 6. Clarificador             |
| 7 Cárcamo de bombeo de agua tratada    | 8. Cárcamo de lodos         |

Figura 4.1 Generación de lodos en la PTAR de la industria textil

## 2) Cribado

El cribado grueso y fino se lleva a cabo mediante rejillas, el cribado grueso tiene el propósito de evitar la entrada de materiales que puedan causar problemas de obstrucción, como marañas de hilo, papel, basura, etc. El cribado fino tiene por objetivo la remoción de pelusas y fibras, que por el carácter de la industria, se encuentran presentes. Las rejillas de cribado se encuentran al final de las líneas de tubería.

### 3) Tanque de floculación – coagulación.

Esta parte del tratamiento tiene la finalidad de eliminar los sólidos suspendidos que se encuentran en el agua utilizando un agente coagulante catiónico y un floculante aniónico (las cantidades suministradas se ajustan con los resultados obtenidos en las pruebas de jarras realizadas en el laboratorio), para después proseguir con la neutralización del agua, ya que como se mencionó en el capítulo 2 uno de los principales problemas en el tratamiento del agua residual de la industria textil es su elevado pH, en este caso el agua que llega a la PTAR tiene un pH de aproximadamente 11 unidades, lo cual hace necesaria la neutralización para posteriormente realizar un tratamiento biológico. La neutralización del efluente se consigue utilizando ácido sulfúrico, hasta bajar a un pH de 7 unidades, en esta unidad se generan lodos del tratamiento fisicoquímico los cuales se evacúan y llevan hasta el cárcamo de lodos.

### 4) Sistema de lodos activados

Una vez neutralizada el agua pasa al tanque de lodos activados, la cantidad de sólidos suspendidos totales oscila entre  $3000 \text{ mgL}^{-1}$  y  $6000 \text{ mgL}^{-1}$ , cabe mencionar que se tiene un sistema de tratamiento termofílico, ya que la temperatura de las descargas se encuentra entre  $38$  y  $45^\circ\text{C}$ , la aireación se lleva a cabo utilizando aireadores superficiales en este tanque se presentan problemas por asolvamiento de lodos y exceso de espumas por surfactantes, el efluente de esta unidad llega a un sedimentador primario, sin embargo las características del efluente todavía presentan elevadas cargas de DQO por lo que se hace necesario un sistema de clarificación. La figura 4.2 muestra el sistema de lodos activados con un exceso de espuma, atribuida a los surfactantes utilizados en el proceso.

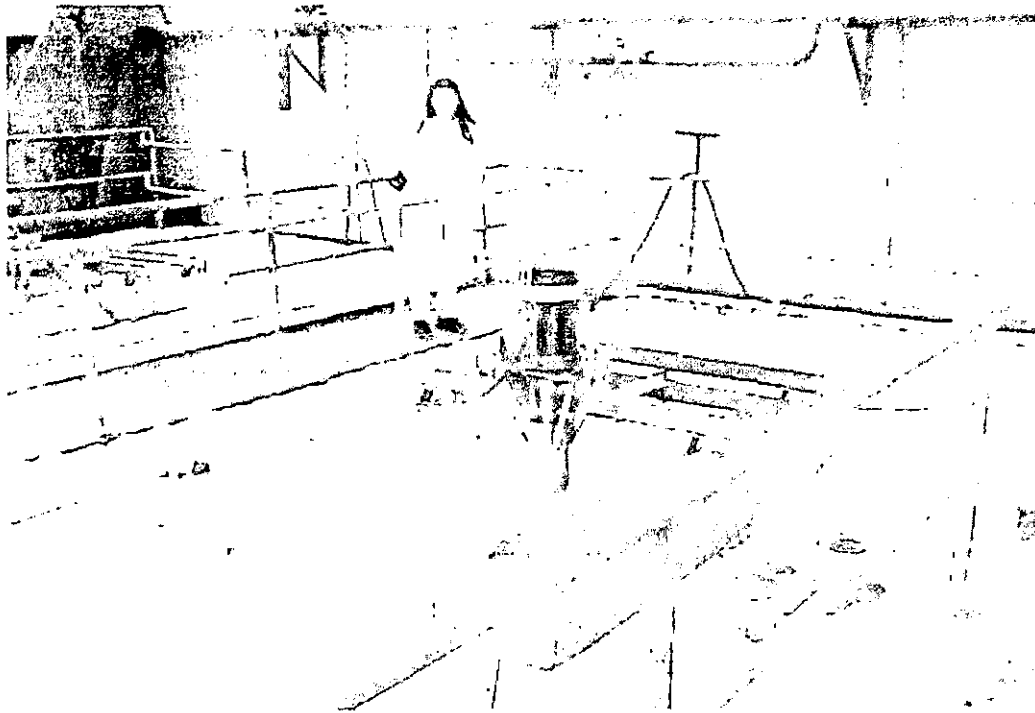
### 5) Sedimentador secundario

En el sedimentador secundario se tiene la remoción de los sólidos generados en el tratamiento de lodos activados, en esta unidad se eliminan los lodos secundarios, una fracción se envía a recirculación y el resto se conduce al cárcamo de bombeo de lodos para mezclarse con los lodos primarios y terciarios.

### 6) Clarificador

El agua se conduce a un clarificador, en el cual se dosifica sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ), un coagulante catiónico y un floculante aniónico, las cantidades a dosificar dependen de los resultados obtenidos en la

pruebas de jarras, parámetro que rige al efectuar dichas pruebas es la remoción de contaminantes eliminados por precipitación química y medidos como DQO. Los lodos generados en este tratamiento terciario se llevan al cárcamo de bombeo de lodos.



**Figura 4.2 Sistema de lodos activados de la PTAR de la industria textil**

#### 7) Cárcamo de bombeo de agua tratada

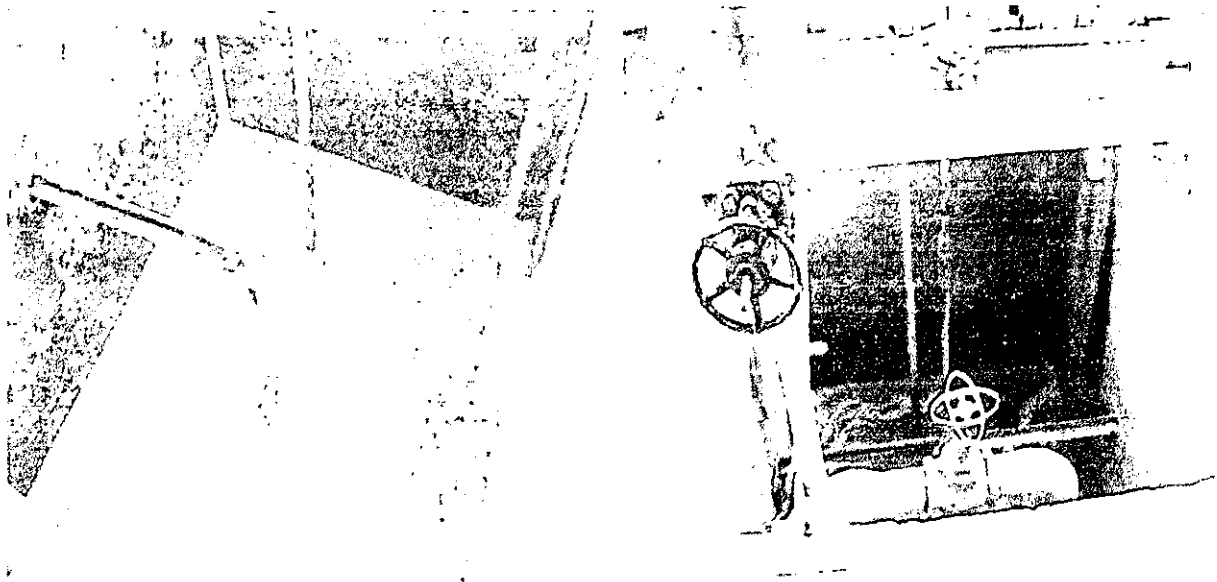
El agua clarificada se capta en un cárcamo de donde se descarga al alcantarillado municipal, con un pH de aproximadamente 7.5 unidades, la DQO de salida es de 300 mgL<sup>-1</sup>, obteniéndose una eficiencia medida como DQO del 70%, en el efluente no se tienen microorganismos patógenos ni sustancias que hagan del efluente un residuo peligroso. En el laboratorio de la planta se determinan diariamente, pH, conductividad, DQO, grasas y aceites, OD y SST (en el licor de mezclado), fósforo, fosfatos, hierro y sulfatos. El costo del tratamiento del agua es de \$8-\$10/m<sup>3</sup>.

#### 8) Cárcamo de bombeo de lodos

Los lodos que se producen en la planta son los provenientes del tanque de coagulación - floculación, del clarificador y del sistema de lodos activados, es decir son lodos del tratamiento, primario, secundario y terciario, todos estos lodos se homogenizan con agitación en el cárcamo de bombeo de lodos y



pertenecen a la clase orgánico hidrófilo. En la planta se generan de 0.5 a 1 ton de lodo por mes, estos lodos no reciben ningún tratamiento de estabilización, sólo se deshidratan usando un filtro prensa para alcanzar del 40 al 50% de humedad y se transportan en un camión hasta un relleno sanitario en donde se realiza su disposición final, estos lodos no se consideran peligrosos de acuerdo al análisis CRETIB (Anexo I), la figura 4.3 muestra el cárcamo de lodos de la PTAR.



**Figura 4.3 Cárcamo de lodos de la PTAR de la industria textil**

#### **4.2 Muestreo**

El muestreo de lodos fue realizado en el turno vespertino los días martes y jueves de los meses de octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo del 2000 y 2001 respectivamente. Se tomaron muestras simples del cárcamo de bombeo de lodos (figura 4.3). Los lodos se caracterizaron el mismo día del muestreo durante los meses de octubre, noviembre y diciembre, se consideró un promedio de los parámetros (pH, SSV, DBO<sub>5</sub> total, DQO) para utilizarlo como características del influente de los reactores aerobio y anaerobio. Los resultados de la caracterización del influente se muestran en el capítulo 5.

### 4.3 Técnicas de caracterización y evaluación

La caracterización de los lodos se realizó utilizando métodos analíticos establecidos en el manual Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1992). La caracterización se llevó a cabo en los Laboratorios de Ingeniería Ambiental de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, en la Universidad Nacional Autónoma de México, en Cd. Universitaria.

Los parámetros de caracterización se muestran en la tabla 4.1, y se determinaron en el lodo suministrado por la planta, en el licor de mezclado de los reactores aerobio y anaerobio, y en el lodo de efluente en ambos reactores, con la finalidad de observar su comportamiento durante la operación, sin realizar análisis en el sobrenadante.

**Tabla 4.1 Parámetros de caracterización y evaluación de lodos**

Parámetro	Método	Influyente	Licor de mezclado	Efluente	Frecuencia
DBO <sub>5</sub> total	Potenciométrico	X		X	2/semana
DQO	Espectrofotométrico	X		X	2/semana
STT	Gravimétrico	X		X	3/semana
SFT	Gravimétrico	X		X	3/semana
SVT	Gravimétrico	X	X	X	3/semana
OD	Potenciométrico	X	X	X	2/semana

Debido a que los lodos residuales derivados de las plantas de tratamiento de la industria textil aparecen en el listado de residuos peligrosos de la NOM-052-ECOL-1993, el anexo número 1 muestra los resultados del análisis CRETIB (Corrosivo, Reactivo, Explosivo, Tóxico, Inflamable, Biológico-infeccioso), realizados por un laboratorio certificado, los cuales fueron proporcionados por la industria textil.

### 4.4 Características y arranque de los reactores

En esta sección del capítulo se describen las características del reactor aerobio y anaerobio, así como la metodología de arranque en cada caso.

#### 4.4.1 Características del reactor aerobio

El reactor biológico usado fue una celda Eckenfelder con capacidad de 20 L, la sección de sedimentación separada por una mampara del tanque de aireación tiene un volumen de aproximadamente 1.5 L. En esta sección se encuentra un tubo de desfogue que permite drenar lentamente el lodo (efluente) así como un vertedero por rebosamiento por donde se evacúa el sobrenadante. La mampara que separa la parte de aireación de la de sedimentación fue colocada aproximadamente a 3 cm del fondo de la celda para permitir la recirculación de lodos del tanque de sedimentación hacia el de aireación. La alimentación de aire se realizó a través de un difusor poroso colocado en un extremo del reactor, el aire alimentado fue tomado de la tubería de suministro de laboratorio (ver figura 4.4).

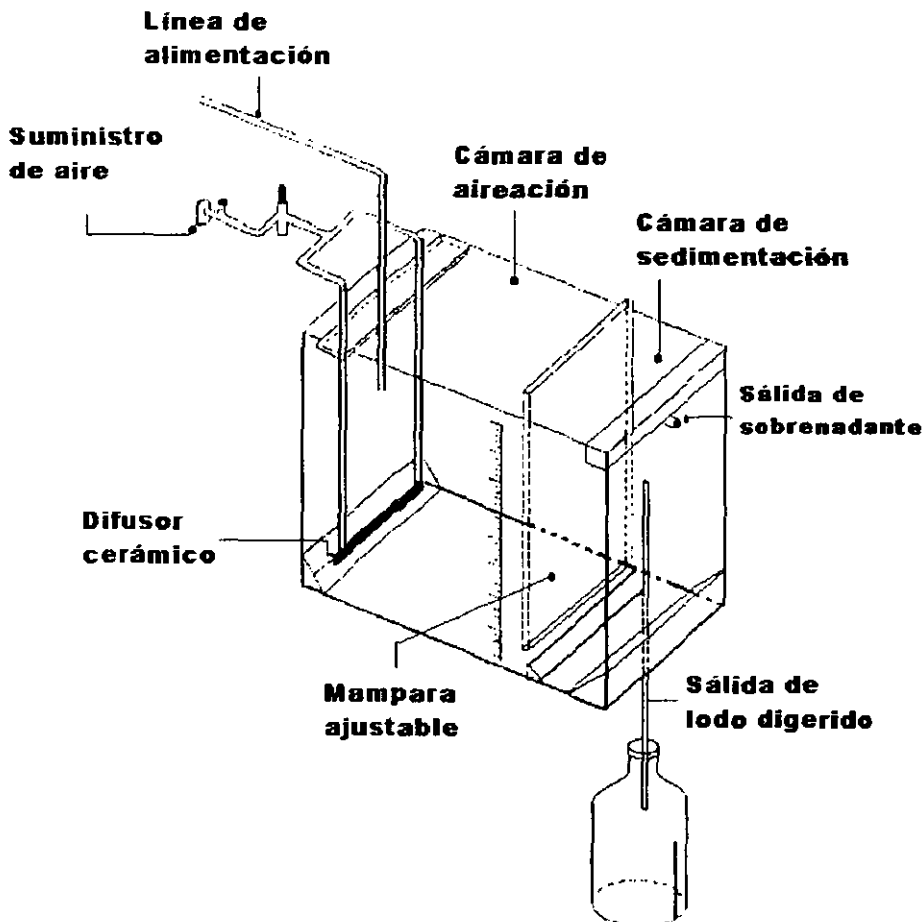


Figura 4.4 Celda Eckenfelder empleada en el proceso aerobio

#### 4.4.2 Arranque del reactor aerobio

La estabilización se inició estimulando la reproducción de microorganismos capaces de degradar los contaminantes que se encuentran en los lodos de la PTAR de CU de acuerdo con la siguiente metodología.

- La primera etapa consistió en alimentar agua residual para propiciar el crecimiento de lodos, el cual se realizó durante el mes de Octubre.
- En la segunda etapa se alimentaron gradualmente lodos de la PTAR de la industria textil durante mes y medio (Noviembre y Diciembre), esto con la finalidad de aclimatar tales microorganismos a las características de los lodos residuales de la industria textil. Los reactores se mantuvieron sin alimentación hasta finales del mes de Enero momento en el cual se inicio un rearranque de los reactores hasta el inicio de su estabilización.
- La tercera etapa se alimentaron los lodos de la industria textil durante aproximadamente 3 semanas con aireación continua y un tiempo de retención hidráulica de 20 días hasta obtener condiciones estables como se muestra en las gráficas 5.2 y 5.3.

La alimentación y purga de los reactores durante las tres etapas se describen a continuación: en un principio se pensó en alimentar los lodos utilizando bombas peristálticas, sin embargo, se presentaron problemas por atascos del equipo y se optó por alimentar un litro de lodo diariamente por carga hidráulica (régimen semicontinuo con un tiempo de retención hidráulica de 20 días), purgando previamente lodo de efluente para mantener el volumen constante en el reactor. En el tanque de aireación se presentaron problemas con el exceso de espumas atribuidos a las altas concentraciones de tensoactivos, lo cual ocasionó un derrame excesivo de lodos, el problema fue resuelto regulando el gasto de aire suministrado, sin embargo, fue necesario probar con diferentes gastos ya que tampoco permitieran el asentamiento de lodos en las esquinas del reactor.

Se consideró el inicio de la estabilización una vez que se observó el descenso en la relación SVT/STT. Por lo referente a pH (7.5) y temperatura (18°C) no se registraron problemas en ningún caso, la

concentración de oxígeno disuelto fue de  $3 \text{ mgL}^{-1}$ . El tiempo necesario para iniciar la estabilización en este reactor fue de aproximadamente tres semanas a partir del rearranque.

#### 4.4.3 Características del reactor anaerobio.

Para el tratamiento anaerobio se utilizó un reactor tipo huevo con capacidad de 25 litros, con un volumen útil de 20 litros, cerrado y con agitación mecánica continua y vigorosa, cubierto con un aislante térmico para evitar cambios bruscos de temperatura y recubierto con una delgada lámina de aluminio con la finalidad de impedir el paso de la luz (ver figura 4.5).

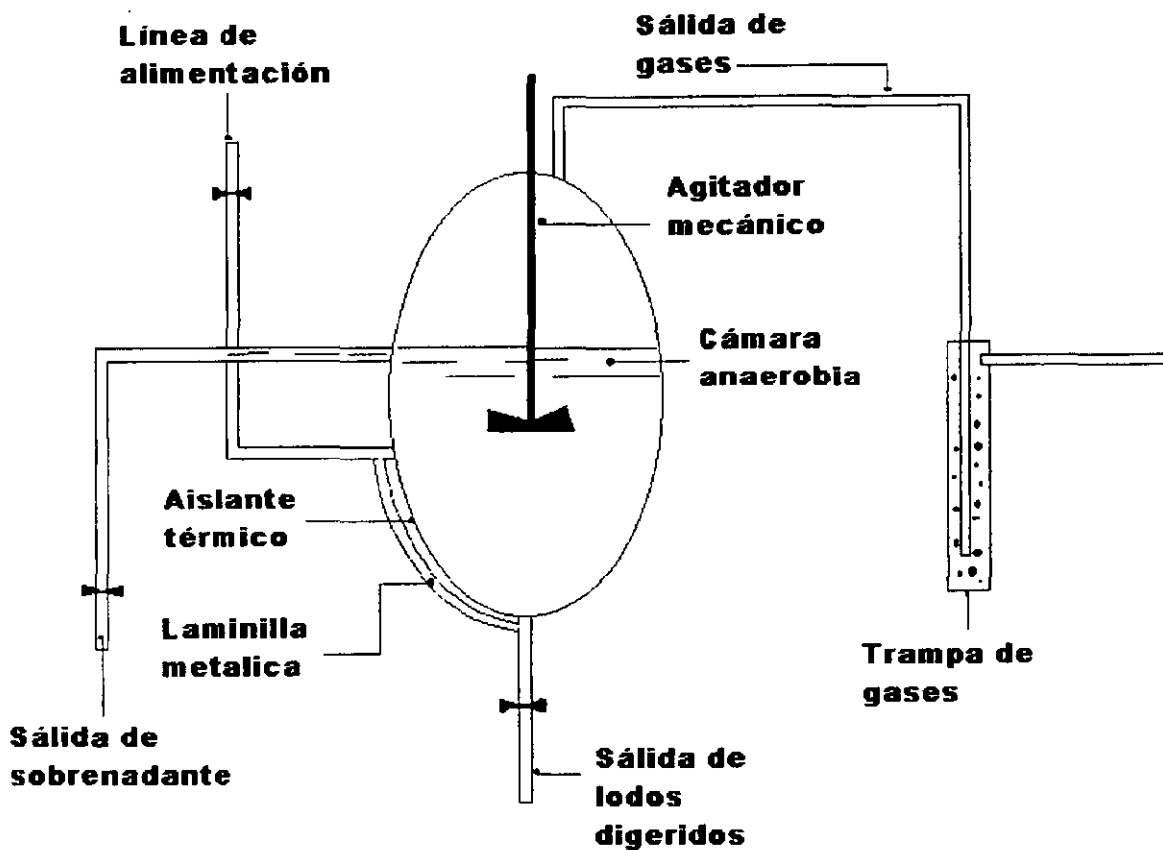


Figura 4.5 Reactor tipo huevo empleado en el tratamiento anaerobio

La evacuación de lodos se realizó por la parte inferior del reactor, al igual que en el reactor aerobio, se purgo antes de alimentar la cantidad necesaria de lodo para mantener el volumen de lodos en el reactor constante (20 litros), el sobrenadante se evacuó por rebosamiento por la parte central del reactor, el

biogás fue conducido hacia una trampa con solución saturada de hidróxido de sodio (NaOH) y liberada directamente a la atmósfera, no se realizó la cuantificación del biogás generado, debido a que se tenían fugas por el orificio de entrada de la flecha del agitador.

#### **4.4.4 Arranque del reactor anaerobio**

En el arranque del reactor anaerobio se siguió el mismo procedimiento que para el reactor aerobio, es decir, se propició el crecimiento de los microorganismos presentes en los lodos generados en el tratamiento de agua residual de la PTAR de C.U., para después alimentar los lodos provenientes de la PTAR de la industria textil, el volumen del tanque utilizado por los lodos fue al igual que en el reactor aerobio de 20 litros, el tiempo de retención hidráulica fue de 20 días, y se trabajó de forma semicontinua, alimentando cada 24 horas por carga hidráulica 1 L de lodo. Las condiciones de pH y temperatura dentro del reactor fueron: pH = 7 y temperatura = 19°C.

#### **4.4.5 Comparación de las variables de operación**

La tabla 4.2 muestra las variables de operación para los reactores. Se puede observar que dichas variables son prácticamente las mismas, con la finalidad de comparar la remoción de contaminantes aplicando condiciones similares en ambos tratamientos (aerobio y anaerobio), además de que en los dos casos estas serían las condiciones promedio a las que los reactores podrían operar en una PTAR. En cuanto al reactor anaerobio, lo anterior plantea condiciones críticas de operación (sin calentamiento), lo que podría en un momento dado ser explotado de mejor manera en una PTAR ya que el lodo proveniente de las diferentes etapas tiene una temperatura de alrededor de 30°C, es decir una temperatura óptima para este tipo de digestores.

Tabla 4.2 Comparación de las variables de operación.

Variables de operación	Reactor aerobio	Reactor anaerobio
Tipo de reactor	Celda Eckenfelder	Ovoide
Régimen de operación	Semicontinuo	Semicontinuo
Volumen del reactor (l)	20	20
Tiempo de retención hidráulica (días)	20	20
Volumen alimentado (l/d)	1	1
Carga orgánica (kgDQO/kg SST d)	0.022	0.020
Temperatura (°C)	18	19
pH	7 – 7.5	6.8 – 7.3
Oxígeno disuelto (mgL <sup>-1</sup> )	3	-
Agitación vigorosa continua	Difusor	Mecánica

Las figuras 4.6 y 4.7 muestran la Celda Eckenfelder utilizada en el proceso aerobio y el reactor tipo huevo utilizado en el proceso anaerobio respectivamente.

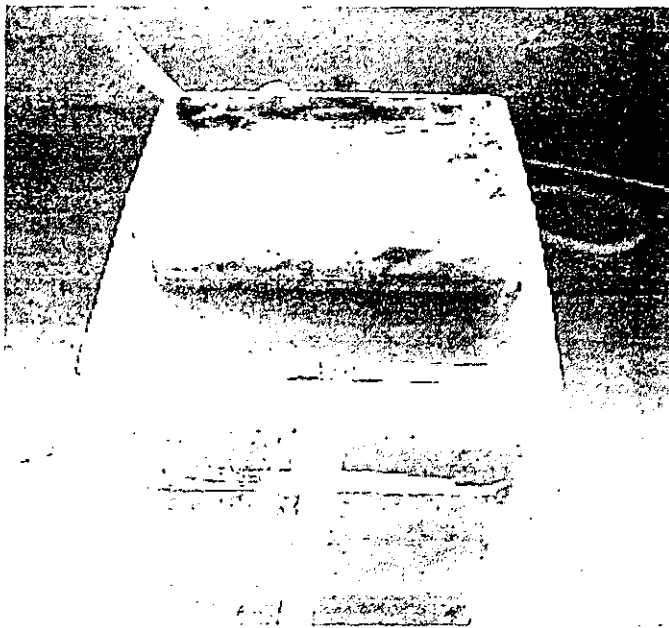


Figura 4.6 Celda Eckenfelder

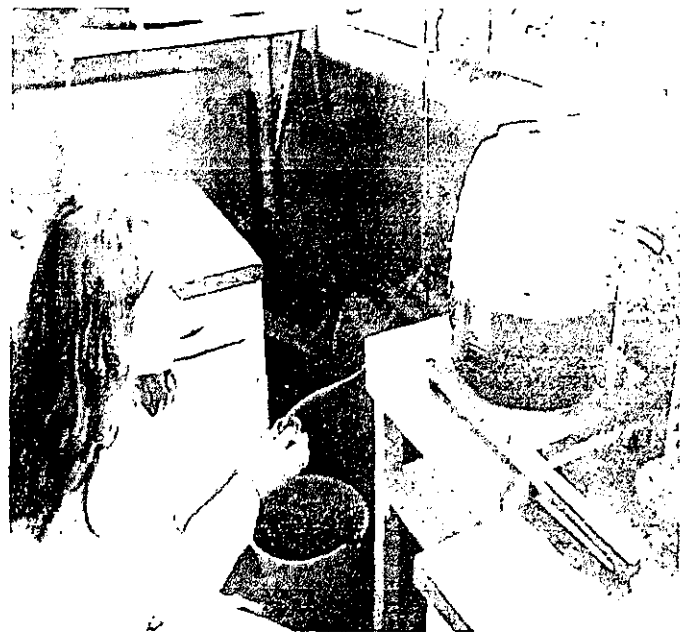


Figura 4.7 Reactor tipo huevo

## **Capítulo 5. Resultados y discusión**

En este capítulo se presentan los resultados de los análisis efectuados a las muestras del lodo utilizado como influente a los reactores y el comportamiento de los parámetros de control durante la etapa de arranque.

### **5.1 Caracterización de lodos residuales**

En la tabla 5.1 se presentan los valores promedio de las características de pH, temperatura y densidad de los lodos, estos parámetros se midieron en el periodo comprendido del 28 de septiembre al 30 de noviembre. Las determinaciones de pH, temperatura y densidad, se realizaron en la PTAR inmediatamente después de tomar la muestra. Con los resultados individuales se calculó la probabilidad acumulada utilizando un método para manejo de datos con un número de muestras inferior a 24, con la finalidad de obtener el 50% de la probabilidad de ocurrencia (González, 1997).

Los parámetros mencionados son importantes para iniciar el arranque y mantener la operación de los sistemas, debido a que son factores fundamentales en el crecimiento de microorganismos, los que posteriormente degradarán el sustrato. El valor medio de pH se encuentra alrededor de las 7.7 unidades, es decir tiende ligeramente a ser básico, resultando benéfico, ya que de lo contrario no podría estimularse el crecimiento de microorganismos en el reactor anaerobio, el cual no debe llegar a condiciones ácidas que inhiban el sistema. La temperatura media obtenida durante el muestreo fue de 34°C, esta característica puede resultar ventajosa para el tratamiento anaerobio ya que no es necesario dar un precalentamiento al sustrato antes de alimentarlo al reactor sino más bien mantener las condiciones de temperatura, bajo tales condiciones el proceso de degradación es más rápido, y por lo tanto los tiempos de retención más cortos, resultando también en un ahorro de energía, sin embargo para el tratamiento aerobio esto podría resultar una desventaja, ya que con tales condiciones de temperatura las cantidades de oxígeno disuelto en el licor de mezclado disminuyen, generando así, un incremento en las necesidades de suministro de oxígeno y por tanto energéticas. Por esta razón en el laboratorio se probaron ambos sistemas bajo las mismas condiciones de temperatura.

La densidad es otro parámetro importante ya que esta variable determina el tipo de equipo que deberá ser utilizado en el suministro de lodos al sistema de tratamiento. El resultado de la densidad



media se encontró alrededor de 1.20 g/ml, es decir ligeramente mayor a la densidad del agua (0.99 g/ml, 20°C), esta pequeña variación y las basurillas en los lodos causaron problemas de atasco en las bombas peristálticas, por lo que tuvo que recurrirse a una alimentación semicontinua y por carga hidráulica.

**Tabla 5.1 Características de pH, Temperatura y  $\rho$  en el influente**

Fecha	pH	Temperatura	Densidad (g/ml)
28-Sep-2000	8.5	33	0.95
03-Oct-2000	7.7	38	1.01
05-Oct-2000	7.2	34	1.30
09-Oct-2000	8.2	25	1.10
17-Oct-2000	7.5	25	2.00
19-Oct-2000	7.4	42	1.20
24-Oct-2000	8.1	45	1.05
26-Oct-2000	7.3	35	1.30
31-Oct-2000	7.5	33	1.20
07-Nov-2000	8.4	34	1.30
09-Nov-2000	7.8	35	1.10
14-Nov-2000	7.9	36	1.30
16-Nov-2000	7.3	38	1.10
20-Nov-2000	7.2	29	1.20
23-Nov-2000	8.2	30	1.30
28-Nov-2000	8.4	42	1.00
30-Nov-2000	7.6	27	1.202
<b>Promedio</b>	<b>7.7</b>	<b>34</b>	<b>1.20</b>

Además de los parámetros ya mencionados se determinaron los sólidos totales (STT), los sólidos volátiles totales (SVT) y los sólidos fijos totales (SFT), estos últimos cuantifican la materia orgánica e inorgánica respectivamente. En los lodos utilizados como influente para los reactores se determinaron como valor medio de STT 33.90 g/l, la determinación de SVT arrojó un valor medio de 19.2 g/l y para los SFT fue de 14.7 g/l, encontrándose que aproximadamente el 57% del material contenido en los lodos es orgánico y el 43% inorgánico, la tabla 5.2 muestra los resultados de STT, SVT y SFT para los lodos residuales (influente). La figura 5.1 muestra la relación de SVT/STT en el lodo de influente.

Tabla 5.2. Características de STT, SVT y SFT en el influente

Fecha	Día No	STT (g/l)	SFT (g/l)	SVT (g/l)
10-Oct-2000	1	71.9	17.9	53.9
17-Oct-2000	8	10.7	2.7	8.0
19-Oct-2000	10	44.9	27.8	17.0
24-Oct-2000	15	47.3	30.4	16.9
26-Oct-2000	17	29.9	24.7	5.3
31-Oct-2000	22	39.1	14.7	24.5
03-Nov-2000	25	51.0	33.0	18.0
07-Nov-2000	29	45.6	33.3	12.3
09-Nov-2000	31	47.6	27.2	20.33
14-Nov-2000	36	29.8	8.8	21.0
16-Nov-2000	38	28.8	9.3	20.5
21-Nov-2000	43	28.4	9.4	19.0
23-Nov-2000	45	29.4	9.2	20.3
28-Nov-2000	50	29.4	9.9	19.6
30-Nov-2000	52	32.5	13.3	19.2
<b>Promedio:</b>		<b>33.90</b>	<b>14.70</b>	<b>19.20</b>

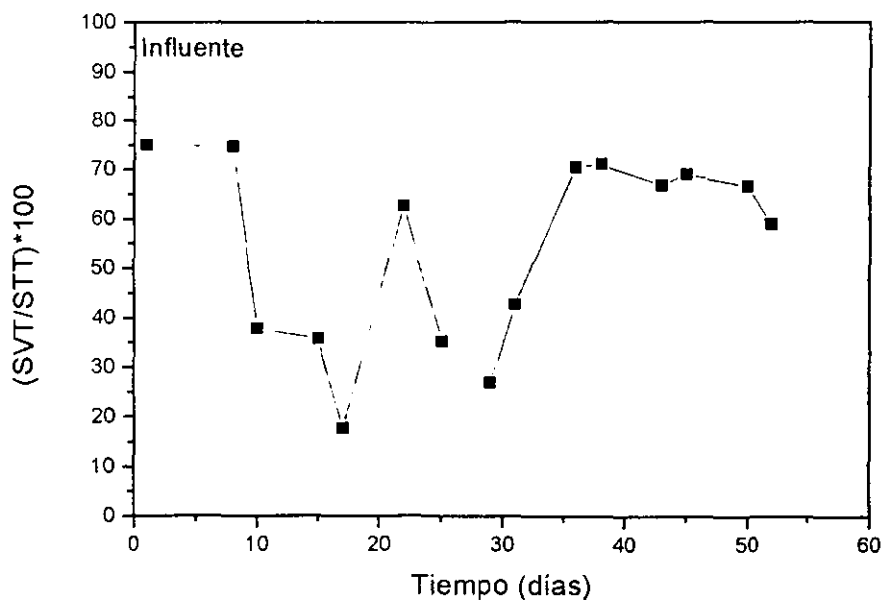


Figura 5.1 Relación de SVT/STT en el influente

Las tablas 5.3 y 5.4 muestran los resultados obtenidos en las pruebas de DBO<sub>5</sub> y DQO, para realizar estas pruebas fue necesario diluir considerablemente las muestras de lodo, los análisis se realizaron por triplicado, para obtener un promedio de cada muestra, resultados que se muestran a continuación. El valor medio para la DBO<sub>5</sub> total fue de 6386 mgL<sup>-1</sup> y para la DQO<sub>5</sub> total fue de

28297 mgL<sup>-1</sup>. Estos valores permiten obtener la relación DBO<sub>5</sub>:DQO resultando de 1:4, lo que indica que la presencia de contaminantes químicos es mucho mayor que la concentración de materia orgánica biodegradable, de esta manera, si bien se tiene una importante cantidad de sólidos que se consumen en la combustión (orgánicos), estos resultan de difícil biodegradación.

**Tabla 5.3 Características de DBO<sub>5</sub> total en los lodos de influente**

Fecha	DBO <sub>5</sub> (mgL <sup>-1</sup> )
11-Oct-2000	6614
19-Oct-2000	7739
26-Oct-2000	7797
16-Nov-2000	5086
23-Nov-2000	8110
30-Nov-2000	4739
07-Dic-2000	6162
14-Dic-2000	4430
<b>Promedio</b>	<b>6383</b>

**Tabla 5.4. Características de DQO en lodos de influente**

Fecha	DQO mgL <sup>-1</sup>
10-Oct-2000	30400
17-Oct-2000	28450
19-Oct-2000	29500
24-Oct-2000	24300
26-Oct-2000	27250
31-Oct-2000	31100
07-Nov-2000	28300
09-Nov-2000	27440
14-Nov-2000	28229
16-Nov-2000	27540
21-Nov-2000	25730
23-Nov-2000	28890
28-Nov-2000	29560
30-Nov-2000	26430
05-Dic-2000	28720
07-Dic-2000	26800
<b>Promedio</b>	<b>28297</b>

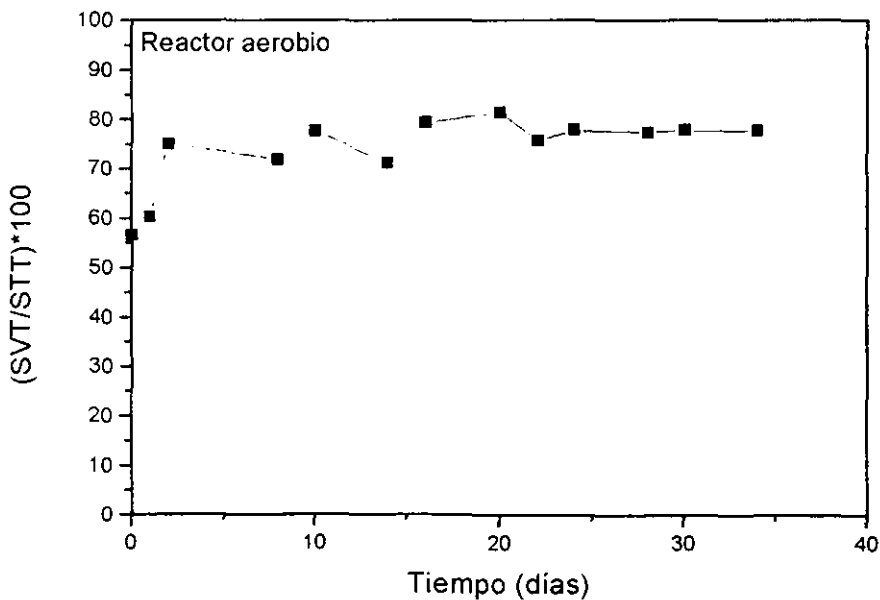
## 5.2 Arranque del reactor aerobio

La tabla 5.5 muestra los resultados con los que se construyó la gráfica de la figura 5.2, en estos valores puede observarse un incremento en general de los sólidos, notándose un incremento considerable en la cantidad de SVT hasta aumentar en seis veces su valor inicial, esto se explica

con el incremento de microorganismos en el licor de mezclado. La estabilización aerobia de lodos consiste en una aireación prolongada, para provocar el desarrollo de microorganismos aerobios, hasta sobrepasar el periodo de síntesis de las células y llevar a cabo su propia autooxidación. Este crecimiento de microorganismos tiende a estabilizarse después de un periodo de tiempo a partir del arranque del reactor, la figura 5.2 muestra la relación de SVT/STT en el licor de mezclado durante la etapa de arranque, la curva alcanza su valor más alto alrededor del 80%, a partir de este valor, alcanzado 20 días después del arranque, se observa una ligera reducción en la relación SVT/STT, lo cual puede explicarse con el inicio de la etapa de autooxidación de las células.

**Tabla 5.5 Resultados de STT, SVT y SFT en el licor de mezclado**

Estabilización del reactor aerobio				
Fecha	Día No.	STT (g/l)	SFT (g/l)	SVT (g/l)
Influyente	0	33.9	14.7	19.2
31-Ene-01	1	43.3	17.2	26.1
01-Feb-01	2	73.8	19.9	55.4
07-Feb-01	8	121.3	34.0	87.3
09-Feb-01	10	119.4	26.6	92.8
13-Feb-01	14	120.3	34.6	85.7
15-Feb-01	16	147.0	30.3	116.7
19-Feb-01	20	147.5	27.4	120.2
21-Feb-01	22	142.5	34.5	108.0
23-Feb-01	24	147.8	32.5	115.2
27-Feb-01	28	146.8	33.0	113.8
01-Mar-01	30	147.5	32.4	115.0
05-Mar-01	34	146.5	32.5	114.0



**Figura 5.2 Relación SVT/STT en el reactor aerobio**

### 5.3 Arranque del reactor anaerobio

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en el licor de mezclado del reactor anaerobio. Los microorganismos que crecen en este tipo de reactores se desarrollan lentamente, y son muy sensibles a las variaciones de pH, por tanto se cuidó que la producción de ácidos volátiles no de lugar a un descenso del pH que inhibiera el proceso. La tabla 5.6 muestra los valores de pH registrados durante la estabilización del reactor, notándose un ligero descenso del pH que va de 7.7 unidades hasta 6.9 que fue el valor de pH más bajo. Además en el licor de mezclado del reactor se midieron los STT, SVT y SFT, los valores obtenidos se muestran en la tabla 5.6. El comportamiento de lo sólidos fijos es similar al del reactor aerobio encontrándose un incremento de aproximadamente un 50% del valor inicial, para el caso de los sólidos volátiles totales se registró un incremento de cinco veces el valor inicial. Esto puede atribuirse al consumo de ácidos grasos volátiles producidos durante la etapa de licuefacción, que posteriormente son degradados a metano por las bacterias metanogénicas. A diferencia del reactor aerobio el arranque del reactor anaerobio es más lento, sin embargo se encontró una disminución en la relación SVT/STT a partir del día 22 muy semejante al reactor aerobio, la disminución de la relación SVT/STT para el caso del reactor anaerobio es ligeramente mayor (1.2%) que en el reactor anaerobio. La figura 5.3 muestra el comportamiento de la relación SVT/STT en el licor de mezclado.

**Tabla 5.6 Resultados de STT, SVT y SFT en el licor de mezclado**

Estabilización del reactor anaerobio					
Fecha	Día No.	pH.	STT (g/l)	SFT (g/l)	SVT (g/l)
Influyente	0	7.7	33.90	14.7	19.2
01-Feb-01	3	7.7	53.9	17.2	36.7
06-Feb-01	6	7.5	65.7	24.5	42.2
08-Feb-01	8	7.8	67.3	23.8	43.5
12-Feb-01	12	7.2	94.5	22.2	72.3
14-Feb-01	14	7.0	122.4	26.6	95.8
16-Feb-01	16	7.1	128.5	24.4	104.1
20-Feb-01	20	7.0	135.9	25.2	110.7
22-Feb-01	22	6.9	130.6	25.6	104.9
26-Feb-01	26	7.2	128.2	33.0	95.2
28-Mar-01	28	7.1	140.2	33.0	107.2
02-Mar-01	30	7.2	129.8	33.1	96.7
06-Mar-01	36	7.0	133.5	32.4	101.1
08-Mar01	38	7.0	132.3	32.8	99.5

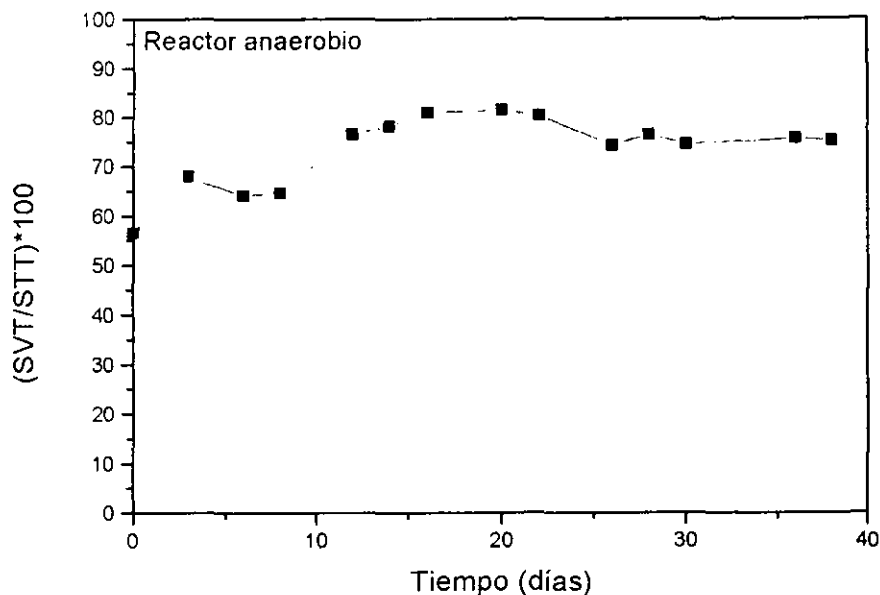


Figura 5.3 Relación de SVT/STT en el reactor anaerobio

#### 5.4 Caracterización de lodos de efluente

Los parámetros de calidad determinados en los lodos después de ser alimentados a los reactores son DBO<sub>5</sub> total y DQO, a continuación se muestran los resultados comparando eficiencias de remoción en ambos sistemas durante la etapa de arranque.

##### 5.4.1 Resultados obtenidos en el reactor aerobio

Los lodos de efluente provenientes del reactor aerobio presentan una reducción de contaminantes medida como DBO de aproximadamente un 70%, esto se explica con la remoción de materia orgánica disuelta en los lodos consumida durante el arranque del reactor y utilizada para la reproducción de microorganismos, a partir del día 23 se observan valores de la DBO<sub>5</sub> total muy cercanos, iniciándose una etapa de estabilización lo cual se refleja en la disminución de la relación de SVT/STT explicada en el punto 5.2. La remoción de contaminantes medida como DQO fue de aproximadamente un 50% y se observa también el inicio de la estabilización a partir del día 23. Las tablas 5.7 y 5.8 muestran los resultados de DBO<sub>5</sub> total y DQO respectivamente, observados durante la etapa de arranque del reactor aerobio, las figuras 5.4 y 5.5 permiten ver el comportamiento de estos parámetros con el paso del tiempo.

#### 5.4.2 Resultados obtenidos en el reactor anaerobio

Para los lodos evaluados provenientes del reactor anaerobio se observó una remoción de contaminantes medida como DBO<sub>5</sub> de aproximadamente el 56%, la remoción de contaminantes medida como DQO fue del 60%, si bien ambos valores son muy cercanos se encontró el inicio de la degradación de contaminantes disueltos que el tratamiento aerobio no fue capaz de degradar en el mismo periodo de tiempo, además para la eficiencia de la DBO encontrada en este sistema debe considerarse que la prueba de DBO es una prueba que se realiza en condiciones aerobias y por lo tanto el resultado arrojado se considera menor al real. El comportamiento de los parámetros DBO<sub>5</sub> y DQO son muy semejantes a los obtenidos en el reactor aerobio, observándose el inicio de la estabilización a partir del día 28, lo cual concuerda con el comportamiento de SVT/STT explicado en el punto 5.3. Los resultados obtenidos para el caso del reactor anaerobio se muestran en las tablas 5.9 y 5.10, las figuras 5.4 y 5.5 permiten comparar el comportamiento en ambos parámetros para los sistemas de digestión aerobio y anaerobio.

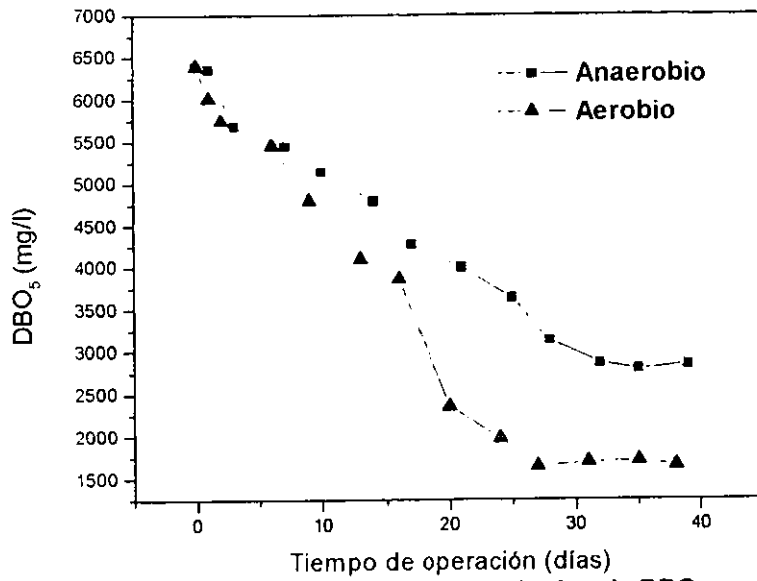


Figura 5.4. Comparación de los resultados de DBO<sub>5</sub>

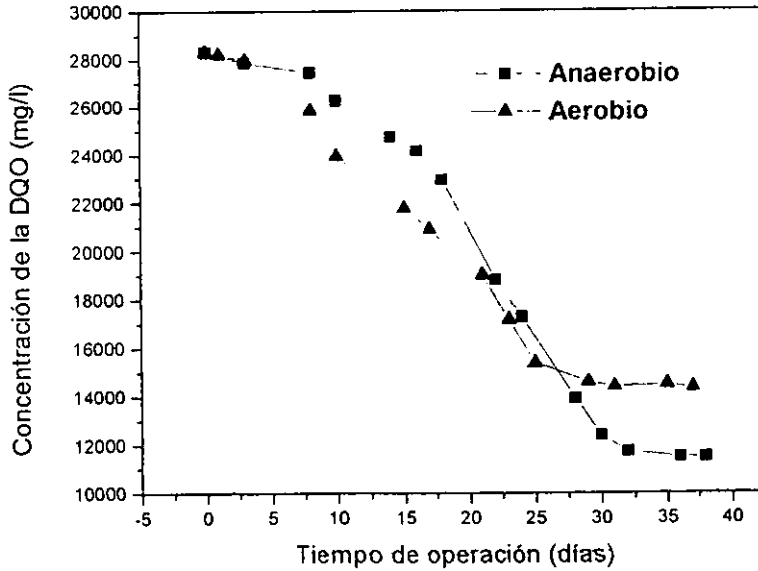


Figura 5.5. Comparación de los resultados de DQO



**Tabla 5.7 Resultados de DBO<sub>5</sub> en el efluente aerobio**

Lodos en el reactor aerobio		
Fecha	No de día	DBO <sub>5</sub> total (mgL <sup>-1</sup> )
Influyente	0	6383
31-Ene-2001	1	6010
01-Feb-2001	2	5739
05-Feb-2001	6	5450
08-Feb-2001	9	490
12-Feb-2001	13	4100
15-Feb-2001	16	3860
19-Feb-2001	20	2348
23-Feb-2001	24	1970
26-Feb-2001	27	1640
02-Mar-2001	31	1690
05-Mar-2001	35	1700
09-Mar-2001	38	1645
Efluente	Promedio de los últimos cuatro datos	1669

**Tabla 5.9 Resultado de DBO<sub>5</sub> en el efluente anaerobio**

Lodos en el reactor anaerobio		
Fecha	No de día	DBO <sub>5</sub> total (mgL <sup>-1</sup> )
Influyente	0	6383
31-Ene-2001	1	6349
01-Feb-2001	3	6080
05-Feb-2001	7	5679
08-Feb-2001	10	5321
12-Feb-2001	14	4788
15-Feb-2001	17	4267
19-Feb-2001	21	3994
23-Feb-2001	25	3630
26-Feb-2001	28	3127
02-Mar-2001	32	2855
05-Mar-2001	35	2790
08-Mar-2001	39	2835
Efluente	Promedio de los últimos cuatro datos	2828

**Tabla 5.8 Resultados de DQO en el efluente aerobio**

Lodos en el reactor aerobio		
Fecha	No de día	DQO total (mgL <sup>-1</sup> )
Influyente	0	28297
31-Ene-2001	1	28200
02-Feb-2001	3	27954
07-Feb-2001	8	25829
09-Feb-2001	10	23920
13-Feb-2001	15	21756
15-Feb-2001	17	20875
19-Feb-2001	21	18980
21-Feb-2001	23	17124
23-Feb-2001	25	15365
27-Feb-2001	29	14590
01-Mar-2001	31	14398
05-Mar-2001	35	14489
07-Mar-2001	37	14370
Efluente	Promedio de los últimos cuatro datos	14462

**Tabla 5.10 Resultado de DQO en el efluente anaerobio**

Lodos en el reactor anaerobio		
Fecha	No de día	DQO (mgL <sup>-1</sup> )
Influyente	0	28297
01-Feb-2001	3	27863
06-Feb-2001	8	27440
08-Feb-2001	10	26259
12-Feb-2001	14	24720
14-Feb-2001	16	24150
16-Feb-2001	18	22939
20-Feb-2001	22	18794
22-Feb-2001	24	17260
26-Feb-2001	28	13895
28-Feb-2001	30	12372
02-Mar-2001	32	11730
06-Mar-2001	36	11500
08-Mar-2001	38	11483
Efluente	Promedio de los últimos cuatro datos	11771

Las ventajas y desventajas encontradas en la aplicación de ambos procesos de digestión a los lodos generados por el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil se muestran en la tabla 5.11.

Tabla 5.11 Ventajas y desventajas encontradas en la estabilización aerobia y anaerobia de lodos

Proceso de estabilización	Ventajas	Desventajas
A E R O B I O	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere menor tiempo de estabilización.</li> <li>• Fácil de operar.</li> <li>• Tareas de mantenimiento relativamente sencillas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere un alto suministro de oxígeno, debido a la temperatura del lodo, incrementando los costos de operación.</li> <li>• Remoción de compuestos recalcitrantes inferior a la del tratamiento anaerobio.</li> <li>• Transporte de compuestos volátiles y patógenos por medio de aerosoles.</li> </ul>
A N A E R O B I O	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede aprovecharse la temperatura del lodo en la operación del reactor, lo cual reduciría los costos energéticos.</li> <li>• Dado que el pH de los lodos tiende a ser básico, no se tienen problemas por acidificación de lodos que inhiban el sistema anaerobio.</li> <li>• Remueve una cantidad considerable de compuestos recalcitrantes.</li> <li>• Generación de biogás que puede ser aplicado en la operación del reactor, o bien, utilizarse como combustible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere un tiempo de estabilización superior al del tratamiento aerobio.</li> <li>• La operación de este tipo de reactores es más compleja que la de un reactor aerobio.</li> <li>• Tareas de mantenimiento complicadas.</li> </ul>

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos se presentan las conclusiones y recomendaciones, cabe resaltar que el caso de estudio es para una sola industria textil, la cual está dedicada a la producción de hilos de algodón y sus mezclas sintéticas.

### 6.1 Conclusiones.

1. La aplicación de los procesos de digestión aerobio y anaerobio, comúnmente utilizados en la digestión de lodos municipales, resultó favorable también para la remoción de contaminantes (medidos como  $\text{DBO}_5$  y DQO) en los lodos derivados de la PTAR de la industria textil del caso estudiado.
2. La caracterización fisicoquímica de los lodos de la PTAR de la industria textil objeto de estudio del presente trabajo arrojó los siguientes resultados:  $\text{pH}=7.7$ , temperatura =  $34^\circ\text{C}$ , densidad =  $1.2 \text{ g/ml}$ ,  $\text{STT} = 33.9 \text{ g/l}$ ,  $\text{SVT} = 14.7 \text{ g/l}$ ,  $\text{SFT} = 19.2 \text{ g/l}$ ,  $\text{DBO}_5 \text{ total} = 6.4 \text{ g/l}$  y  $\text{DQO} = 28.3 \text{ g/l}$ .
3. Para el reactor aerobio la etapa de arranque duró aproximadamente 20 días obteniéndose al final de este periodo una relación de  $\text{SVT}/\text{STT} = 0.815$ . En el caso del reactor anaerobio, el periodo de arranque tomó 22 días con una relación de  $\text{SVT}/\text{STT} = 0.803$ . A partir de entonces se inició la etapa de estabilización (gráficas 5.2 y 5.3).
4. Al final de la etapa de arranque la remoción de contaminantes medida como  $\text{DBO}_5$  en el reactor aerobio fue de aproximadamente un 70%, mientras que en el anaerobio fue de alrededor del 56%. En el caso de la DQO, se observó para el reactor aerobio una remoción de cerca del 50% y del 60% para el anaerobio.
5. Además de las ventajas expuestas en la tabla 5.11, en el presente estudio se observó que durante la etapa de arranque del reactor anaerobio se removió una mayor cantidad de contaminantes (DQO) por lo que se considera el más apropiado en el tratamiento de este tipo de lodos.

## 6.2 Recomendaciones

1. Es de suma importancia conocer el tipo de materia prima utilizada en los procesos productivos empleados en países como México para rubros específicos, como es el caso de la industria textil, ya que en países como Alemania, Suiza, E. U. etc., muchos colorantes han sido sustituidos o eliminados del mercado por sus características tóxicas, por ende se recomienda la generación de inventarios de productos utilizados en la industria textil.
2. La legislación aplicada en México no incluye compuestos que son resultado de la degradación parcial de contaminantes como los mencionados en el presente trabajo, los cuales al ser concentrados en el lodo pueden disponerse de manera inadecuada por el desconocimiento de sus repercusiones en la salud y el ambiente, por tanto se recomienda incluir este tipo de sustancias en las normas.
3. De acuerdo con la revisión bibliográfica diversos colorantes pueden degradarse bajo condiciones aerobias o anaerobias, sin embargo en estos procesos la degradación es sólo parcial por lo que se recomienda utilizar métodos que acoplen de sistemas aerobio y anaerobio.
4. Es necesario dar un seguimiento que permita conocer la biodegradabilidad de contaminantes específicos, así como el mecanismo de su degradación, con la finalidad de determinar en qué etapa el residuo puede disponerse sin riesgos a la salud y al ambiente. Sin embargo, también es necesario experimentar con los efluentes tal y como se generan en la industria.
5. La metodología seguida en el arranque de los sistemas aerobio y anaerobio para la obtención de datos sobre la estabilización de lodos derivados de la industria textil empleada en el presente trabajo puede ser tomada como ejemplo para aplicarse a los lodos generados por otros rubros industriales.

## Bibliografía

### **Adriaens, P. y Hickey, W. J. (1994)**

Physiology of bidegradative microorganisms, en: Biotechnology for the treatment of hazardous wastes. D. L. Stoner, Ed. Lewis Publishers, pp: 97-135. Londres, Inglaterra.

### **Anliker, R., During, D., Steinle y Moriconi, J.E. (1998)**

List of colorants to be classified as toxic. JSDC. Mayo/Junio: 223-225.

### **APHA (1992)**

#### **Métodos Normalizados para el Análisis de Agua limpia y agua residual.**

American Public Health Association, E.U.A.

### **Bruce, A. M. (Ed), (1984)**

Sewage Sludge Stabilization and Disinfection. Ellis Howood Limited WCR.

### **CANAINTEX (1999)**

Cámara Nacional de la Industria Textil

<http://www.aiimag.com/aiiesp/aarchives/0399/mar99stor5.html>

### **CEC (1986)**

Council of the European Communities, 1986.

Directive concerning sludge amendments, Off. J. June, 12, L181/6

### **CEPIS-GTZ (1997)**

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente en colaboración con la Agencia de Cooperación Técnica de la República Alemana (GTZ)

Proyecto de fortalecimiento técnico en la Región de América Latina y el Caribe.

Informe Técnico sobre minimización de residuos en la industria textil, Noviembre de 1997.

<http://cepis.ops.oms.org/>

<http://gtz.de/home/english/index/html>

### **CMA-GTZ (1998)**

Comisión Ambiental Metropolitana en colaboración con la Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ)

Manual de minimización, tratamiento y disposición. "Concepto de manejo de residuos peligrosos e industriales para el giro textil".

Septiembre, 1998.

### **CEPIS/REPAMAR (1999)**

Manejo Ambientalmente Adecuado de Lodos Provenientes de Plantas de Tratamiento

Dirección de Medio Ambiente, Quito, Agosto de 1999.

<http://www.cepis.org.pe/eswww/repamar/gtzproye/lodos.html>

### **CRESPI, M. (1994)**

Revista de Química Textil, No. 117. Abril-Junio, 1994, referido en CEPIS/REPAMAR, 1999.

**CRESPI, M. (1995)**

Procesos productivos en la industria textil. "Seminario de Gestión Ambiental para la Industria Textil". CIT-INTI, julio de 1995, Buenos Aires, Argentina.

**Cruz, A. y Buitrón, G. (1999)**

Biodegradation of disperse blue 79 using sequenced anaerobic/aerobic biofilters. *Trabalhos Completos, VI Oficina e Seminário Latino-Americano de Digestão Anaeróbia, ANAIS, Volume I, Pernambuco, Brasil, pp. 255-262*

**CSIC (2001)**

Consejo Superior de Investigaciones Científicas cuantifican la presencia de contaminantes poco conocidos en aguas residuales de industrias de la piel y textil. <http://www.dicat.csic.es/barcesp.html>, publicada en la revista *Environmental Science & Technology* el 15 de Septiembre de 2001. Unión Europea.

**Chao, W.L. y Lee, S.L.. (1994)**

Decoloration of azo dyes by three white-rot fungi: Influence of carbon source. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 10:556-559.

**Degrémont (1979)**

Manual Técnico del Agua, Bilbao, España, 1979. pp 105-473, 749-781.

**Dubbin, P. y Wright, K. L. (1975)**

Reduction of azo food dyes in culture of *Proteus vulgaris*. *Xenobiotica* 5: 563-571.

**Dunnivant, F. M., Schwarzenbach, R. P. y Macalady D. L. (1992)**

Reduction of substituted nitrobenzenes in aqueous solutions containing natural organic matter. *Environmental Science and Technology* 26: 2133-2141

**Fair, G. y Geyer, J. (1999)**

Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales. Vol. 2, México, 1999, pp. 621-629.

**Fernández, G. (1981).**

Características y tratamiento de los desagües industriales textiles., Instituto de Tecnología Industrial. 20 p. Buenos Aires, Argentina

**Fernández, G. y Frey, G. (1995).**

Taller sobre minimización de residuos y producción más limpia en América Latina y el Caribe. México, D.F.

**García, M. (1996)**

Decoloración de colorantes azo y trifenolmetano por *Phanerochaete chrysosporium* por fermentación en medio sólido. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Iztapalapa. México, D.F., México

**Gennaro, M. C., Van, A., Ferrera, E., Petronio, B.M., Petruzzelli, G. y Liberatori A. (1991).**

A Characterization study of matter in municipal treatment sludges by reversed-phase HPLC chromatography. *J. Environ. Sci. Health, A* 26(7), 1115-1138.

**Genevini, P.L., Vismara, R. y Mezzanotte, V. (1986).**

Utilizzo agricolo dei fanghi di depurazione. *Ingegneria ambientale*, 5. Milano. Obtenido de: Efecto de la adición de un lodo residual sobre las propiedades del suelo: experiencias de campo. Dic. de 1998, Universidad de Vigo, España. pp. en internet: <http://edafologia.ugr.es/Revista/Tomo5/Art/Texto.html>.

**Gibson, D. T. y Subramanian, B. (1984)**

Microbial degradation of aromatic hydrocarbons, en: *Microbial degradation of organic compounds*. D. T. Gibson, Ed. Marcel Dekker, Inc. pp: 181-253. Nueva York, E.U.A.

**González, M. S. y González, B. O. (1997)**

Apuntes de plantas de tratamiento de aguas residuales, Septiembre de 1997.

División de estudios de postgrado

Facultad de ingeniería, Sección de ingeniería ambiental, U.N.A.M.

**Idaka, E., Horitsu, H. y Ogawa, T. (1987)**

Some properties of azoreductase produced by *Pseudomonas cepacia*. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 39: 982-989

**Hornick, S.B. y Kaufman, D.D.(1983)**

Textile Wastes, Land treatment of hazardous wastes, 1983, pp. 388-396

US Dep. Agric., Biol. Waste Manage & Org. Resour. Lab., Beltsville Agric. Res. Cent

<http://quimba.dqb.uchile.cl/~fmartinez/Q134B/aminas/Aminas.HTML>. Julio de 2001.

<http://www.agro.uba.ar/agrotxt/siav/notas/biosol.htm>, Abril de 2001.

<http://www.bla.org.uk/html/legislación/german-azo.shtml>, Noviembre de 2000.

<http://www.cwis.polyu.edu.hk/~itc/vrspilot.htm>, Noviembre de 2000.

[http://www.dgi.unam.mx/boletin/bdboletin/2000\\_432.html](http://www.dgi.unam.mx/boletin/bdboletin/2000_432.html), Abril de 2001.

<http://www.emision.com/161.htm>, Marzo de 2001.

<http://www.emison.com/143.HTM>, Marzo de 2001.

<http://www.kommanet.nl/demo/ne020996.html>, Noviembre de 2000.

[http://www.medioambientenews.com/planta\\_de\\_compostaje.htm](http://www.medioambientenews.com/planta_de_compostaje.htm), Abril de 2001.

<http://www.promptuarium.org/ciclo.htm>, Abril de 2001.

<http://www.tdctrade.com/alert/eu9906.htm>, Noviembre de 2000.

**INE-SEMARNAP (1996-2000).**

Dirección General de Materiales, Residuos y Actividades Riesgosas, INE; Programa para la Minimización y Manejo Integral de los Residuos Industriales en México, 1996-2000, INE/SEMARNAP, 1996. <http://www.ine.gob.mx/opsec/programas/proq-rip/cap9.htm>

**INEGI (1993)**

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.  
Fuente XIV Censo industrial, México, 1993.

**INEGI (1999)**

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.  
<http://www.inegi.gob.mx.estadistica/español/feconomia/html>

**Kuramoto, N. y Kitao, T. (1982)**

Contribution of synglet oxygen to the photofading of some dyes. *JSDC 98* (Oct): 334-340

**LGEEPA (1988)**

Gobierno de la República, Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), *Diario Oficial de la Federación*, México, 28 de enero de 1988.

**Legret, M. y Juste, C. (1988).**

Migration et speciation des métaux lourds dans un sol soumis a des epadges de boues de station d'epuration a tres forte charge en Cd et Ni. *Wat. Res.*, 22(8), 953-959.

**Lue Hing, C. y Zenz, D.R. (1992)**

Municipal Sewage Sludge Management: Processing, Utilization and Disposal. Technomic, Publishing Co.

**Metcalf & Eddy. (1991)**

Wastewater Engineering, treatment, disposal, reuse. Singapore, 1991.

**Moeller, G. (1997)**

Biological Treatment of Municipal Sludge. Biotechnology for Water Use and Conservation. *The Mexico 96 Workshop*. OECD Paris, Cedex, France.

**Motchi, H. (1994)**

Assesment and management of environmental exposure to colorants, en: *Environmental exposure: Colorants*. pp 329-335.

**NOM-052-ECOL-1993** que establece las características de los residuos peligrosos, listado de los mismos y límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.



**NOM-004-ECOL-1999.** Anteproyecto de norma oficial. Protección ambiental. LODOS Y BIOSOLIDOS. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

**Ottaviani, M., Santarsiero, A., y De Fluvio, S. (1991).**

Hygienic, Technical and legislative aspects of agricultural sewage sludge usage. *Acta Chim. Hunf.* 128 (4-5), 535-543.

**Paszczynski, A., Pasti-Grigsby M., Goszczynsky, S., Crawford, R.L. y Crawford, D.L. (1992)**

Mineralization of sulphonated azo dyes and sulphanic acid by *Phanerochaete chrysosporium* and *Streptomyces chromofuscus*. *Applied Environmental Microbiology* 58 (11): 3598-3604

**Programa priorizado de normas (1999)**

Programa priorizado de normas, República de Chile, Comisión Nacional del Medio Ambiente, ASR/PMC, Gobierno de Santiago de Chile, 1999.

**Quezada, M., Linares, I. y Buitrón, G. (2000)**

Use of sequencing batch biofilter for degradation of azo dyes (acid and bases)  
*Water Science and Technology* pp. 329-336

**Rafii, F. y Cerniglia, C. E. (1995)**

Reduction of azo dyes and nitro aromatic compounds by bacterial enzymes from the human gastrointestinal tract. *Environmental Health Perspectives* 103 (Suplemento 5): 17-19

**Razo-Flores, E. (1997)**

Biotransformation and biodegradation of N-substituted aromatics in methanogenic granular sludge. Tesis doctoral. Universidad Agrícola de Wageningen, 162 pp. Wageningen, Holanda

**Residuos en Dinamarca (1997),** <http://www.dk/publica/AffaldsEs.pdf>

**República de Chile (2000)**

Consejo Directivo de la Comisión Nacional del Medio Ambiente ASR/PMC, Exenta N° 0027, Santiago, Chile, Programa Priorizado de Normas; Ley 19,300.

**Rodinel (1990)**

Minimización de residuos peligrosos generados en la industria de algodón y fibras artificiales. Universidad Nacional de Ingeniería, 80 pp, Lima, Perú

**Schnitzer, M. (1991)**

Soil organic matter – The next 75 years. *Soil. Sci.*, 51 (1), 41-58.

**Spain, C. (1995)**

Biodegradation of nitroaromatic compounds. *Annual Review Microbiology* 49: 523-555

**Tester, C.F. (1990)**

Organic amendment effects on physical and chemical properties of a sandy soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53 (3), 827-831.

**USEPA (1982).**

ENVIRONMENTAL PROTECTION SERVICE. Survey of textile wet processing and pollution abatement technology. Ottawa, EPS. 126 p., E. U. A.

**USEPA (1992).**

Environmental Regulations and Technology, "*Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge*".

Environmental Protection Agency  
Washington, 1992.

**USEPA (1994).**

A Plain English Guide to the Environmental Protection Agency, part. 503 Rule.

Environmental Protection Agency  
Washington, 1994.

**USEPA (1995).**

A Guide to the Biosolids risk Assessments for the EPA, part 503.

Environmental Protection Agency  
Washington, 1995.

**Waste magazine ambiental, 2001.** <http://www.ideal.es/waste/lodos.html>

**Winkler, M. A.(1998)**

Tratamiento biológico de aguas de desecho, Editorial: Limusa, 1998.

## ANEXO I

### Análisis CRETIB de los lodos residuales de la PTAR de la industria textil.

Los análisis CRETIB se realizaron por un laboratorio certificado conforme a lo establecido en la NOM-053-ECOL-1993 y proporcionados por la industria textil, dando como resultado que el lodo es un residuo no peligroso, estos resultados se muestran en los siguientes recuadros.

#### *Análisis CRETIB*

#### RESULTADOS DEL ANÁLISIS CRETIB

##### Apariencia:

Estado físico: Sólido.

Descripción física: Lodo.

Color: Café.

Olor: Fétido.

##### a) Corrosividad:

pH= 7.3 unidades. (No Corrosivo)

##### b) Reactividad:

1. Bajo condiciones de golpe, presión, temperatura o espontáneamente: No se descompone, combina o polimeriza vigorosamente.

2. No es normalmente inestable y se combina o transforma violentamente sin detonación.

3. No reacciona con el agua en relación de 5:1, 5:3, 5:5, violentamente formando gases o vapores.

4. No posee en su constitución sustancia que cuando se exponen a condiciones de pH (HCl, 1.0 N) y básico (NaOH 1.0 N) genera gases, vapores o humos en relaciones 5:1, 5:3, 5:5.

Componente Peligroso	Máximo permisible mg/kg B.H.	Resultado mg/kg B.H.
Cianuros	250	N.D.
Sulfuros	500	3.90

##### c) Explosividad.

1. No es más sensible a golpes o fricción que el dinitrobenceno.

2. No es capaz de producir una reacción o descomposición detonante o explosiva a 25°C y a 1.03 kg/cm<sup>2</sup> de presión.

## d) Toxicidad al ambiente (concentración de compuestos en el lixiviado).

## 1. Metales

Componente peligroso	Máximo permisible (mgL <sup>-1</sup> )	Resultado (mgL <sup>-1</sup> )
Arsénico	5.0	Menor de 0.01
Bario	100.0	4.03
Cadmio	1.0	Menor de 0.005
Cromo hexavalente	5.0	Menor de 0.010
Niquel	5.0	Menor de 0.010
Mercurio	0.2	Menor de 0.010
Plata	5.0	Menor de 0.05
Plomo	5.0	Menor de 0.05
Selenio	1.0	Menor de 0.020

## 2. Compuestos orgánicos volátiles.

## 2.1 Hidrocarburos aromáticos volátiles.

Componente peligroso	Máximo permisible (mgL <sup>-1</sup> )	Resultado (mgL <sup>-1</sup> )
Benceno	0.5	Menor de 0.010
Tolueno	14.4	Menor de 1.000

## 2.2 Hidrocarburos alifáticos halogenados.

Componente peligroso	Máximo permisible (mgL <sup>-1</sup> )	Resultado (mgL <sup>-1</sup> )
Cloroformo	6.0	Menor de 0.010
Cloruro de metilo	8.6	Menor de 1.000
Cloruro de vinilo	0.2	Menor de 0.010
1,2-Dicloroetano	0.5	Menor de 0.010
1,1- Dicloroetileno	0.7	Menor de 0.010
1,1,1,2 -Tetracloroetano	10.0	Menor de 0.010
1,1,2,2-Tetracloroetano	1.3	Menor de 0.010
Tetracloruro de carbono	0.5	Menor de 0.100
Tetracloroetileno	0.7	Menor de 0.020
1,1,1-Tricloroetano	30.0	Menor de 0.010
1,1,2-Tricloroetano	1.2	Menor de 0.050
Tricloroetileno	0.5	Menor de 0.010

## 2.3 Hidrocarburos aromáticos halogenados.

Componente peligroso	Máximo permisible (mgL <sup>-1</sup> )	Resultado (mgL <sup>-1</sup> )
Clorobenceno	100.0	Menor de 0.010

## 2.4 Volátiles varios

Componente peligroso	Máximo permisible (mgL <sup>-1</sup> )	Resultado (mgL <sup>-1</sup> )
Acilonitrilo	5.0	Menor de 1.000
Eter bis (2-cloro etílico)	0.05	Menor de 0.010
Disulfuro de carbono	14.4	Menor de 1.000
Isobutanol	36.0	Menor de 1.000
Etilmetilcetona	200.0	Menor de 1.000
Piridina	5.0	Menor de 1.000

## 3. Compuestos orgánicos volátiles

## 3.1 Hidrocarburos halogenados.

Componente peligroso	Máximo permisible (mgL <sup>-1</sup> )	Resultado (mgL <sup>-1</sup> )
1,2- Diclorobenceno	4.3	Menor de 0.010
1,4- Diclorobenceno	7.5	Menor de 0.100
Hexacloroetano	3.0	Menor de 0.050
Hexaclorobenceno	0.13	Menor de 0.070
Hexacloro 1,3-butadieno	0.5	Menor de 0.050

## 3.2 Nitrocompuestos aromáticos

Componente peligroso	Máximo permisible (mgL <sup>-1</sup> )	Resultado (mgL <sup>-1</sup> )
2,4- Dinitrotolueno	0.13	Menor de 0.020
Nitrobenceno	2.0	Menor de 0.500

## 3.3 Pesticidas clorados

Componente peligroso	Máximo permisible (mgL <sup>-1</sup> )	Resultado (mgL <sup>-1</sup> )
Clordano	0.03	Menor de 0.010
Endrin	0.02	Menor de 0.005
Heptacloro	0.008	Menor de 0.001
Heptacloro epoxido	0.008	Menor de 0.001
Lindano	0.4	Menor de 0.005
Metoxicloro	10.0	Menor de 2.000
Toxafeno	0.5	Menor de 0.100

## 3.4 Fenoles

Componente peligroso	Máximo permisible (mgL <sup>-1</sup> )	Resultado (mgL <sup>-1</sup> )
o- Cresol	200.0	Menor de 0.100
m-Cresol	200.0	Menor de 0.100
p- Cresol	200.0	Menor de 0.100
Fenol	14.4	Menor de 0.100
Pentaclorofenol	100.0	Menor de 0.100
2,3,4,6-Tetraclorofenol	1.5	Menor de 0.100
2,4,5-Triclorofenol	400.0	Menor de 0.100
2,4,6-Triclorofenol	20.	Menor de 0.100

## 3.5 Herbicidas

Componente peligroso	Máximo permisible (mgL <sup>-1</sup> )	Resultado (mgL <sup>-1</sup> )
2,4- Dicrofenoxiacético (2,4-D)	10.0	Menor de 0.040
2,4,5- Fenoxipropionico (SILVEX)	1.0	Menor de 0.020

## e) Inflamabilidad

1. No es capaz de causar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos.
2. No contiene más de 24% de alcohol etílico en volumen
3. Punto de inflamabilidad: Copa cerrada Penski-Martends °C > 80. (Máximo permisible.

## f) Biológico infecciosos

Análisis	Resultado
Coliformes totales	8,100.00 (NMP/g B.H.)
Coliformes fecales	N.D. (NMP/g B.H.)
Hongos y levaduras	N.D. (Col/g BH)

Nota: Los análisis de compuestos orgánicos se efectúan por cromatografía de gases con columnas capilares acoplado a espectrometría de masas.

Los resultados muestran que el lodo generado es un residuo **NO PELIGROSO**.