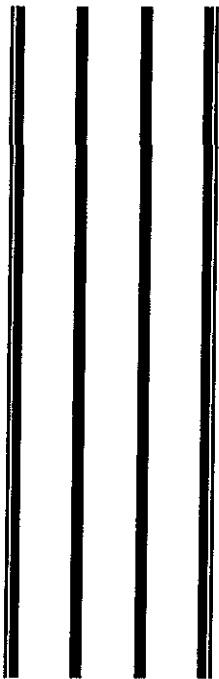


42
24.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



ANALISIS DE FACTIBILIDAD
TECNICO ECONOMICA
DEL TRATAMIENTO DE LODOS
PRODUCIDOS POR LA PLANTA
DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL
"TEXCOCO NORTE"

(ESTUDIO PROSPECTIVO)



T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
I N G E N I E R O C I V I L
P R E S E N T A
OSCAR HERNANDEZ FERNANDEZ

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D.F.

258752

1998



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-057/97

Señor
OSCAR HERNANDEZ FERNANDEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **DR. ADALBERTO NOYOLA ROBLES**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

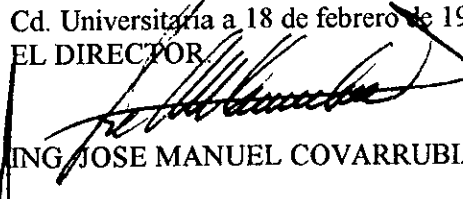
"ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONOMICA DEL TRATAMIENTO DE LODOS PRODUCIDOS POR LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL TEXCOCO NORTE (ESTUDIO PROSPECTIVO)"

- I. INTRODUCCION**
- II. MANEJO DEL AGUA EN EL VALLE DE MEXICO**
- III. PROYECTO DE SANEAMIENTO DEL VALLE DE MEXICO**
- IV. TRATAMIENTO DE LODOS**
- V. ESTABILIZACION CON CAL**
- VI. DIGESTION ANAEROBIA DE LODOS**
- VII. SITIOS DE DISPOSICION**
- VIII. LEGISLACION DE LA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA)**
- IX. ANALISIS TECNICO**
- X. ANALISIS FINANCIERO**
- CONCLUSIONES**
- BIBLIOGRAFIA**

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

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

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 18 de febrero de 1998.
EL DIRECTOR.


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/GMP*lmf



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIVISION DE INGENIERIA CIVIL,
TOPOGRAFICA Y GEODESICA.

ASUNTO: Solicitud de Jurado para Examen
Profesional.
No. OFICIO 60-I-057/97

SR. ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS.
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE
INGENIERIA DE LA UNAM
P R E S E N T E .

El señor **OSCAR HERNANDEZ FERNANDEZ**, registrado con número de cuenta **9353252-9** en la carrera de **INGENIERO CIVIL**, terminó los requisitos académicos necesarios para realizar sus trámites de Examen Profesional, por tal razón solicito a usted autorizar el siguiente Jurado:

PRESIDENTE: ING. SATURNINO SUAREZ FERNANDEZ

VOCAL: DR. ADALBERTO NOYOLA ROBLES

SECRETARIO: ING. VICTOR FRANCO

1er. SUPLENTE: ING. PABLO TORRES SALMERON

2do. SUPLENTE: ING. ARIEL CANO VICARIO

Atentamente.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

EL JEFE DE LA DIVISION

Cd. Universitaria a 19 de febrero de 1998


M.T. GABRIEL MORENO PECERO.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia:

**Sr. Eugenio Lovera Pichardo.
Sra. María Teresa Fernández Valera.
Srita. Erika Lovera Fernández.**

En este momento de mi vida, es tiempo de hacer una pausa en el camino y mirar atrás, para tener presente la senda que he seguido y los pasos que me han hecho avanzar. Es por ello que quiero agradecerles por enseñarme con su ejemplo lo que es la honestidad, el respeto, el honor y el amor por la vida; por su presencia en mis triunfos, valorándolos y no dejándome caer en la vanidad, sino ayudándome a asimilarlos con humildad; por su presencia en mis derrotas, enseñándome a tomarlas como nuevos retos a vencer con coraje y empeño; por su legado de creencias y costumbres, ya que por ello soy un hombre comprometido a vivir y a triunfar; por entenderme y hacerme comprender como ser mejor; por creer en mí.

Por todo ello, agradezco a Dios el haberme dado una familia tan hermosa.

Siempre Suyo.

Oscar.

In Memoriam.

Desde lo más profundo de mi corazón, quiero dedicar mi titulación como Ingeniero Civil a mis abuelitos, el Sr. Julián Fernández Vargas y la Sra. María Teresa Valera Palacios, que desde el cielo han sido la guía de mis pasos.

A mis Padrinos:

**Dr. Edilberto Calderón Galán.
Sra. María Luisa Fernández Valera.**

Por tener siempre abierta la puerta de su corazón y su casa para acogerme, por sus consejos y las palabras de aliento que siempre he recibido, por encontrar en Edy al hermano que siempre anhelé.

A los Ingenieros:

José Manuel Covarrubias Solís

Director de la Facultad de Ingeniería, UNAM

Carlos Castillo Tejero

Coordinador del Programa de Alto Rendimiento Académico

Con todo respeto y admiración les quiero dedicar el presente trabajo de tesis, como una pequeña muestra de mi gratitud, por el respaldo y la confianza que me ofrecieron a lo largo de mi carrera profesional.

Al Dr. Adalberto Noyola Robles.

Por su incondicional apoyo y constante asesoría durante mi estancia en la Coordinación de Bioprocesos Ambientales del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Su ejemplo de dedicación al estudio y al trabajo perdurarán en mí por siempre.

RESUMEN

El Proyecto de Saneamiento del Valle de México cubre aspectos de prevención de riesgos y de control sanitario. El primero tiene como objetivo el reducir los riesgos de inundación en la Ciudad de México mediante la construcción de la infraestructura hidráulica necesaria para conducir los caudales extraordinarios producidos en la época de lluvias; el segundo, el aminorar las restricciones agrícolas, alteraciones en la calidad del agua de las corrientes receptoras, los cuerpos de agua superficial y subterránea, así como el disminuir los altos índices de enfermedades infectocontagiosas y parasitarias en las zonas de uso de las aguas residuales, mediante la construcción de 4 Plantas de Tratamiento de Agua Residual. De éstas, la más grande tratará 44 m³/s y será localizada en las inmediaciones de Texcoco, Estado de México. El tratamiento elegido en el planteamiento oficial para dicho propósito es el denominado "Tratamiento Primario Avanzado (TPA)", que consiste en la adición de reactivos químicos coagulantes para incrementar la sedimentación de la materia orgánica e inorgánica que contienen estas aguas; el sistema se complementa con la estabilización con cal del producto del tratamiento de las aguas residuales (lodos). Se pretende que este material sea finalmente depositado en terrenos del ex-Lago de Texcoco.

Sin embargo, existen métodos alternativos de tratamientos de aguas residuales y de tratamiento y estabilización de lodos cuyos resultados de calidad física, química y biológica pueden cumplir con los parámetros recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), los límites establecidos por la NOM-001-ECOL-1996 y las especificaciones de la regla 503 de la Environmental Protection Agency (EPA), además de enmarcarse dentro de los criterios de sustentabilidad y de reducción del impacto al ambiente, al prescindir de la adición de reactivos químicos.

Con base en lo anterior, en el presente trabajo se analizó técnica y económicamente el TPA con estabilización de lodos con cal y el TPA con digestión anaerobia de lodos. El análisis de las características físicas, químicas y biológicas de la materia resultante del tratamiento permitió determinar que no es recomendable la disposición de la biomasa estabilizada con cal en el Vaso del ex-Lago de Texcoco, debido a que las condiciones desfavorables que ahí existen para la vida vegetal (salinidad y pH del orden de 10) se verían acrecentadas; por otro lado, los lodos digeridos por vía anaerobia presentan las ventajas de una reducción del volumen de lodos generados por m³ de agua residual tratada, además de significar una aportación de materia orgánica importante al terreno, lo que provocaría una reducción del pH del suelo y la posibilidad del desarrollo de vida vegetal más variada.

En lo que respecta al análisis económico se partió de premisas financieras comunes para cualquier tipo de proyecto de infraestructura; se consideraron la disposición directa en el Vaso del ex-Lago de Texcoco y los costos de transporte para la disposición de los lodos en sitios diferentes al antes mencionado.

De los resultados vertidos por estos análisis se propone el diseño de la planta de digestión anaerobia para el tratamiento de lodos, en sustitución al concepto original de estabilización con cal, así como la estructura financiera a la que puede sujetarse dicho proyecto.

RESUMEN	7
CONTENIDO	
RELACIÓN DE TABLAS	15
RELACIÓN DE FIGURAS	17
1. INTRODUCCIÓN	19
2. MANEJO DEL AGUA EN EL VALLE DE MÉXICO	21
2.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y GEOGRÁFICAS DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO	21
2.2. INFRAESTRUCTURA DEL DRENAJE DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO	23
2.2.1. <i>El desarrollo urbano de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México</i>	23
2.2.2. <i>Cauces de escurrimientos artificiales de la Ciudad de México</i>	23
2.2.3. <i>Problemática actual</i>	25
2.3. APROVECHAMIENTO ACTUAL DE LAS AGUAS RESIDUALES	27
2.4. CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL	28
2.5. PROBLEMAS SANITARIOS Y AMBIENTALES PRODUCIDOS POR LAS AGUAS RESIDUALES	30
2.6. EVOLUCIÓN DEMOGRÁFICA Y CRECIMIENTO DE LA MANCHA URBANA	30
2.7. NORMATIVIDAD Y LEGISLACIÓN	31
2.7.1. <i>Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente</i>	31
2.7.2. <i>Ley de Aguas Nacionales</i>	33
2.7.3. <i>Ley Federal de Derechos de Aguas Nacionales</i>	33
2.7.4. <i>Ley de Salud</i>	33
3. PROYECTO DE SANEAMIENTO DEL VALLE DE MÉXICO	35
3.1. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	35
3.2. EFECTOS DE LA IMPLANTACIÓN DEL PROYECTO	35
3.3. ÁREA DE INFLUENCIA DEL PROYECTO A NIVEL LOCAL Y REGIONAL	36
3.4. DATOS GENERALES DEL PROYECTO	37
3.4.1. <i>Túnel del Vaso de Cristo</i>	37
3.4.2. <i>Obras de entubamiento y bombeo en el Nororiente</i>	40
3.4.3. <i>Construcción y operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales para el área metropolitana</i>	42
3.4.3.1. <u>Eficacia en la remoción de organismos patógenos para diversos tipos de tratamiento</u>	42
3.4.3.2. <u>Procedimientos propuestos para el Tratamiento de las aguas residuales de la Zona Metropolitana del Valle de México</u>	43

3.5. ACCIONES DE SANEAMIENTO EN LAS ZONAS DE RIEGO	43
3.6. ACCIONES DE DESARROLLO INSTITUCIONAL	45
3.7. CONTROL DE DESCARGAS AL DRENAJE	45
3.8. CAMPAÑAS DE DESPARASITACIÓN Y DE EDUCACIÓN HIGIÉNICA	45
3.9. REALIZACIÓN DE ESTUDIOS, PROYECTOS Y MONITOREO	46
3.10. CONSIDERACIONES PARA EL MANEJO DE LOS LODOS PRODUCIDOS POR LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL "TEXCOCO NORTE"	47
4. TRATAMIENTO DE LODOS	49
4.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	49
4.1.1. Calidad de los Lodos	49
4.1.1.1. <u>Concentración de Sólidos</u>	49
4.1.1.2. <u>Tamaño de la Partícula</u>	49
4.1.1.3. <u>Distribución del Agua</u>	50
4.1.1.4. <u>Propiedades del Fluido</u>	52
4.1.1.5. <u>Propiedades de Sedimentación</u>	52
4.1.1.6. <u>Olor</u>	52
4.1.1.7. <u>Propiedades Biológicas</u>	54
4.1.1.8. <u>Tóxicos</u>	54
4.1.1.9. <u>Propiedades Químicas</u>	54
4.1.1.10. <u>Drenabilidad</u>	54
4.1.1.11. <u>Propiedades Deshidratantes</u>	55
4.2. CANTIDAD DE LODOS	55
4.3. ESTABILIZACIÓN DE LODOS	55
4.3.1. Evaluación de la Estabilidad	56
4.4. TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN	57
4.4.1. Digestión Anaerobia	57
4.4.2. Digestión Aerobia	59
4.4.3. Secado	61
4.4.4. Incineración	61
4.4.5. Composteo	63
4.4.6. Estabilización con cal	65
4.4.7. Desinfección por Radiación	66
4.5. TECNOLOGÍAS PARA EL DESECADO	66
4.5.1. Lagunas	66
4.5.2. Espesador	68
4.5.3. Espesamiento por Flotación	71
4.5.4. Centrifugación	73
4.5.5. Filtración	77
4.5.6. Lechos de Secado	81

5. ESTABILIZACIÓN CON CAL	83
5.1. FUNDAMENTOS	83
5.2. PRINCIPIO Y CRITERIOS DE DISEÑO	84
5.3. INFRAESTRUCTURA	90
5.3.1. Manejo de la Cal	90
5.3.1.1. <u>Cal Hidratada</u>	90
5.3.1.2. <u>Cal Viva</u>	90
5.3.1.3. <u>Suministro</u>	91
5.3.1.4. <u>Transporte</u>	91
5.3.1.5. <u>Almacenamiento</u>	91
5.3.2. <u>Mezcla Cal/Lodo</u>	92
5.3.2.1. <u>Dosificación</u>	92
5.3.2.2. <u>Tanque de Mezcla de Lodo</u>	92
5.3.2.3. <u>Alternativas para el mezclado</u>	93
5.3.2.4. <u>Requerimientos de Operación</u>	93
5.3.2.5. <u>Requerimientos Físicos y Energéticos</u>	94
5.4. PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS PRODUCIDOS POR EL TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO Y LA ESTABILIZACIÓN CON CAL	96
5.5. BALANCE DE MATERIA DEL TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO Y ESTABILIZACIÓN CON CAL DE LOS LODOS PARA EL CASO EN ESTUDIO	96
6. DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LODOS	101
6.1. INTRODUCCIÓN	101
6.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	102
6.2.1. <i>Hidrólisis</i>	102
6.2.2. <i>Acidogénesis</i>	103
6.2.3. <i>Acetogénesis</i>	103
6.2.4. <i>Metanogénesis</i>	103
6.2.5. <i>Etapa Limitante</i>	103
6.2.6. <i>La Sintrofia como aspecto relevante en la Digestión Anaerobia</i>	104
6.3. CINÉTICA DE LA REACCIÓN EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA	106
6.4. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE IMPORTANCIA	107
6.4.1. <i>pH y Alcalinidad</i>	107
6.4.2. <i>Temperatura</i>	108
6.4.3. <i>Nutrientes</i>	109
6.4.4. <i>Toxicidad</i>	109
6.5. PARÁMETROS DE DISEÑO DE DIGESTORES DE LODOS	111
6.5.1. <i>Tiempo de Retención Celular</i>	112
6.5.2. <i>Factores de Carga Volumétrica</i>	113
6.5.3. <i>Población Servida</i>	114
6.6. TIPOS DE REACTORES ANAEROBIOS PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS	114
6.6.1. <i>Digestión Anaerobia Convencional o de Baja Tasa</i>	114

6.6.2. <i>Digestión Anaerobia de Alta Tasa</i>	115
6.6.3. <i>Digestión Anaerobia de Lodos Separados</i>	116
6.7. <i>PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS PRODUCIDOS POR EL TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO Y LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LODOS</i>	116
6.8. <i>BALANCE DE MATERIA DEL TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO Y DIGESTION ANAEROBIA DE LOS LODOS</i>	117
7. SITIOS DE DISPOSICIÓN	121
7.1. <i>RELLENOS SANITARIOS</i>	121
7.2. <i>DISPOSICIÓN EN TERRENO</i>	121
7.2.1. <i>Nitrógeno y Fósforo</i>	122
7.2.2. <i>Potasio</i>	122
7.2.3. <i>Cadmio</i>	123
7.2.4. <i>Patógenos</i>	123
7.2.5. <i>Mejorador de suelos</i>	124
7.3. <i>DISPOSICIÓN EN POZOS</i>	124
7.4. <i>DISPOSICIÓN EN EL OCÉANO</i>	126
7.5. <i>INCINERACIÓN</i>	126
8. LEGISLACIÓN DE LA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA)	127
8.1. <i>PROVISIONES GENERALES</i>	128
8.2. <i>REQUERIMIENTOS PARA LA DISPOSICIÓN DE LOS LODOS COMO MEJORADORES DE TERRENOS</i>	128
8.3. <i>REQUERIMIENTOS PARA LA DISPOSICIÓN SUPERFICIAL DE LOS LODOS</i>	130
8.4. <i>REQUERIMIENTOS PARA LA REDUCCIÓN DE LA ATRACCIÓN DE PATÓGENOS Y VECTORES</i>	131
8.5. <i>REQUERIMIENTOS PARA LA INCINERACIÓN DE BIOSÓLIDOS</i>	132
9. ANÁLISIS TÉCNICO	133
9.1. <i>TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO (TPA) Y ESTABILIZACIÓN DE LOS LODOS CON CAL</i>	134
9.2. <i>CONDICIONES EDAFOLÓGICAS DEL LAGO DE TEXCOCO</i>	135
9.2.1. <i>Características Geotécnicas-Geohidrológicas</i>	135
9.2.2. <i>Tipo de Vegetación</i>	136
9.2.3. <i>Tipo de Fauna</i>	138
9.2.3.1. <i>Especies Residentes</i>	138
9.2.3.2. <i>Especies Migratorias</i>	138
9.3. <i>SELECCIÓN DEL MÉTODO DE TRATAMIENTO</i>	139
9.4. <i>DISEÑO DEL TRATAMIENTO ANAEROBIO DE LODOS</i>	141
9.4.1. <i>Diseño del Espesador</i>	141

10. ANÁLISIS ECONÓMICO	149
10.1. INVERSIONES EN EL PROYECTO	149
10.1.1. <i>Inversiones Fijas</i>	150
10.1.2. <i>Inversiones Diferidas</i>	150
10.1.3. <i>Capital de trabajo</i>	150
10.2. FINANCIAMIENTO	150
10.2.1. <i>Necesidades de capital</i>	150
10.2.2. <i>Fuentes de financiamiento</i>	151
10.2.2.1. <u>Fuentes externas</u>	151
10.2.2.1.1. <i>Bancos y Fideicomisos</i>	151
10.2.2.1.2. <i>Agencias de crédito</i>	151
10.2.3. <i>Condiciones y Programas de Financiamiento</i>	153
10.3. CORRIDA FINANCIERA	154
10.3.1. <i>Tratamiento Primario Avanzado con Estabilización de lodos con cal</i>	155
10.3.1.1. <u>Premisas</u>	155
10.3.1.2. <u>Estimaciones de Ingreso</u>	157
10.3.1.3. <u>Estimaciones de Operación y Construcción</u>	158
10.3.1.4. <u>Estimaciones de Crédito</u>	159
10.3.1.5. <u>Estado de Resultados</u>	162
10.3.1.6. <u>Orígenes y Aplicaciones</u>	165
10.3.2. <i>Tratamiento Primario Avanzado con Digestión Anaerobia de los lodos.</i>	168
10.3.2.1. <u>Premisas</u>	168
10.3.2.2. <u>Estimaciones de Ingreso</u>	170
10.3.2.3. <u>Estimaciones de Operación y Construcción</u>	171
10.3.2.4. <u>Estimaciones de Crédito</u>	172
10.3.2.5. <u>Estado de Resultados</u>	175
10.3.2.6. <u>Orígenes y Aplicaciones</u>	178
10.3.3. <i>Tabla de Sensibilidades</i>	180
11. CONCLUSIONES	181
12. BIBLIOGRAFÍA	183

RELACIÓN DE TABLAS

	<i>página</i>
TABLA 2.1. <i>Localización de la Infraestructura del alcantarillado del Valle de México.</i>	25
TABLA 2.2. <i>Uso del Agua Residual generada en el Valle de México.</i>	27
TABLA 2.3. <i>Valores Medios de la Calidad del Agua Residual de la ZMCM.</i>	28-29
TABLA 2.4. <i>Índices Sanitarios en Tula y Alfajayucan.</i>	31
TABLA 2.5. <i>Recomendaciones de Riego de Larga Duración (>20 Años) comparados con los Valores Medios en el Agua de Drenaje de la ZMCM.</i>	34
TABLA 3.1. <i>Características del Túnel del Vaso de Cristo.</i>	40
TABLA 3.2. <i>Características Principales de las Obras de Entubamiento y Bombeo en el Nororiente.</i>	40
TABLA 3.3. <i>Etapas de Construcción para las Obras de Rehabilitación del Sistema de Drenaje del Valle de México.</i>	42
TABLA 3.4. <i>Plantas de Tratamiento de la Zona Metropolitana del Valle de México.</i>	42
TABLA 3.5. <i>Remoción esperada de Microorganismos para varios Sistemas de Tratamiento de Aguas de Desecho.</i>	43
TABLA 3.6. <i>Problemas y Soluciones consideradas para el Sanamiento de la Zona de Riego.</i>	46
TABLA 4.1. <i>Concentraciones Típicas de Sólidos en suspensión de los lodos obtenidos por el Tratamiento de las Aguas Residuales Domésticas.</i>	50
TABLA 4.2. <i>Cantidad de lodos producidos de acuerdo con el tipo de proceso.</i>	55
TABLA 4.3. <i>Factores para la Estimación de los Lodos en una Planta de Aguas Residuales Domésticas</i>	56
TABLA 4.4. <i>Aplicación de las Técnicas de Estabilización de Lodos.</i>	57
TABLA 4.5. <i>Criterios Típicos para Digestores Anaerobios.</i>	59
TABLA 4.6. <i>Remoción de Patógenos en un Digestor Anaerobio.</i>	59
TABLA 4.7. <i>Criterios de Diseño de los Reactores de Digestión Aerobia de Lodos.</i>	60
TABLA 4.8. <i>Valor Calorífico de algunos Lodos.</i>	61
TABLA 4.9. <i>Técnicas para la separación Sólido-Líquido de Lodos.</i>	67
TABLA 4.10. <i>Comparación de las operaciones de Espesamiento, Flotación y Centrifugación.</i>	73
TABLA 4.11. <i>VARIABLES DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE UNA CENTRÍFUGA DE TAZÓN.</i>	76
TABLA 5.1. <i>Cantidad de Cal requerida para mantener el Ph en 12 por 30 min.</i>	85
TABLA 5.2. <i>Especificaciones Mecánicas del Mezclado para la Suspensión del Lodo.</i>	94
TABLA 5.3. <i>Características de la Cal.</i>	95
TABLA 5.4. <i>Caracterización de Lodos procedentes de un sistema de Tratamiento Primario Avanzado y Tratabilidad con Óxido de Calcio e Hidróxido de Calcio.</i>	96
TABLA 5.5. <i>Bases de Diseño del Tratamiento Primario Avanzado con Estabilización con Cal de los Lodos.</i>	97
TABLA 6.1. <i>Características de los Lodos.</i>	101
TABLA 6.2. <i>Sustancias Tóxicas o Inhibitorias de la Digestión Anaerobia.</i>	110
TABLA 6.3. <i>Concentraciones de Elementos Inorgánicos que se reportan como inhibitorios para los Microorganismos encargados del Tratamiento Anaerobio.</i>	111

TABLA 6.4.	<i>Algunos Compuestos y Sustancias Orgánicas Inhibitorias de las Bacterias Metanógenas.</i>	111
TABLA 6.5.	<i>Tiempo de Retención Celular sugerido para el Diseño de Digestores Anaerobios.</i>	112
TABLA 6.6.	<i>Coefficientes Cinéticos para la Digestión Anaerobia de Varios Sustratos</i>	112
TABLA 6.7.	<i>Efecto de la Concentración de Sólidos en el Lodo y del Tiempo de Retención sobre el Factor de Carga Volumétrica.</i>	113
TABLA 6.8.	<i>Criterios de Diseño Típicos para el dimensionamiento de Digestores Anaerobios Mesofílicos.</i>	114
TABLA 6.9.	<i>Caracterización Típica de los Lodos.</i>	116
TABLA 6.10.	<i>Bases de Diseño del Tratamiento Primario Avanzado con Digestión Anaerobia de Lodos.</i>	117
TABLA 7.1.	<i>Contenido de N y P en Desechos.</i>	122
TABLA 7.2.	<i>Métodos de Aplicación para Lodos Deshidratados y Equipo.</i>	124
TABLA 7.3.	<i>Métodos de Aplicación Superficial y Subsuperficial y Equipamiento para Lodos Líquidos.</i>	125
TABLA 8.1.	<i>Límites de Contaminantes para la disposición de los lodos como mejoradores de terrenos.</i>	129
TABLA 8.2.	<i>Límites de Contaminantes para la Disposición Superficial de los Lodos.</i>	131
TABLA 9.1.	<i>Características Geotécnicas - Geohidrológicas del ex-Lago de Texcoco.</i>	136
TABLA 9.2.	<i>Tipos de Vegetación en los Sitios de Construcción de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales "Texcoco Norte" y de Disposición de Lodos generados por ésta.</i>	136
TABLA 9.3.	<i>Parámetros de Diseño para Espesadores Circulares.</i>	141
TABLA 9.4.	<i>Parámetros de Diseño de Digestores Anaerobios.</i>	144
TABLA 9.5.	<i>Coefficientes de Transferencia de Calor.</i>	146

RELACIÓN DE FIGURAS

	<i>página</i>
FIGURA 2.1. <i>Regionalización Topográfica de la Cuenca del Valle de México.</i>	22
FIGURA 2.2. <i>Infraestructura del Drenaje en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.</i>	24
FIGURA 2.3. <i>Diagrama de Gastos del Gran Canal.</i>	26
FIGURA 3.1. <i>Modelo Conceptual de la Zona de Influencia del Proyecto.</i>	38
FIGURA 3.2. <i>Trazo del Túnel del Vaso de Cristo.</i>	39
FIGURA 3.3. <i>Obras de Entubamiento y Bombeo en el Nororiente.</i>	41
FIGURA 3.4. <i>Localización de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales de la Zona Metropolitana del Valle de México.</i>	44
FIGURA 4.1. <i>Descripción del Estado del Agua de los Lodos como extracto por Aceleración Centrifuga.</i>	51
FIGURA 4.2. <i>Velocidades de Sedimentación para un Rango de Concentraciones y una Variedad de Lodos.</i>	53
FIGURA 4.3. <i>Relación entre el CO_2 como Gas Digestor y el Bicarbonato Alcalino.</i>	58
FIGURA 4.4. <i>Digestión Aerobia.</i>	60
FIGURA 4.5. <i>Representación Esquemática del proceso básico en la Incineración de Lodos.</i>	62
FIGURA 4.6. <i>Diagrama de una Planta de Incineración de Cámaras Múltiples.</i>	62
FIGURA 4.7. <i>Zonas del Proceso en un Incinerador de Cámaras Múltiples.</i>	63
FIGURA 4.8. <i>Variación de la Destrucción de Patógenos en una operación de Composteo por Apilamiento Nmp (Número más Probable) Burge, 1977.</i>	64
FIGURA 4.9. <i>Planta Típica de Composteo Cerrado.</i>	64
FIGURA 4.10. <i>Aireación Estática en Composteo por Apilamiento.</i>	65
FIGURA 4.11. <i>Velocidad de Interfase Sólido-Líquido.</i>	68
FIGURA 4.12. <i>Sección Transversal de un Tanque de Sedimentación por Gravedad. La gráfica muestra la Concentración Típica de Sólidos en un Sedimentador Continuo.</i>	69
FIGURA 4.13. <i>Efecto de la Altura Inicial y el Diámetro del Cilindro en la Velocidad de Sedimentación para un Lodo Activado Típico de 2 000 Mg/L. Dick, 1967.</i>	70
FIGURA 4.14. <i>Disolución del Aire en un Tanque de Flotación.</i>	71
FIGURA 4.15. <i>Aparato para Pruebas de Flotación.</i>	72
FIGURA 4.16. <i>Efecto de la Relación Aire/Sólido en los Sólidos Sedimentados y en la recuperación de Sólidos Disueltos en el aire en un Sistema de Flotación.</i>	72
FIGURA 4.17. <i>Centrifugación para Sólidos.</i>	73
FIGURA 4.18. <i>Recuperación de Sólidos de una Suspensión Diluida y Concentrada de Carbonato de Calcio.</i>	74
FIGURA 4.19. <i>Prueba de Centrifugación en Tubo de Ensaye.</i>	75
FIGURA 4.20. <i>Penetrómetro usado para estimar la Consistencia de un Lodo.</i>	76
FIGURA 4.21. <i>Recuperación de Sólidos Vs Concentración de Sólidos.</i>	77
FIGURA 4.22. <i>Filtro Rotatorio de Vacío.</i>	77
FIGURA 4.23. <i>Filtro Banda.</i>	78
FIGURA 4.24. <i>Filtro Prensa con Placas y Bastidores.</i>	78
FIGURA 4.25. <i>Prueba de Filtración para Filtros de Vacío.</i>	79

FIGURA 4.26.	<i>Embudo Büchner para la Prueba de Resistencia Específica a la Filtración.</i>	80
FIGURA 4.27.	<i>Resultados obtenidos del Embudo Büchner para la medición de la Resistencia Específica a la Filtración.</i>	80
FIGURA 4.28.	<i>Prueba de Tiempo de Succión Capilar.</i>	81
FIGURA 4.29.	<i>Sección Transversal de una Cama de Arena para Secado.</i>	82
FIGURA 5.1.	<i>Ejemplo del Decaimiento del Ph en la Estabilización con Cal en un Proceso Estándard (Contacto Líquido-Líquido).</i>	86
FIGURA 5.2.	<i>Ejemplo del Decaimiento del Ph para la Estabilización con Cal mediante la Adición de Cal Viva Seca a una mezcla de Lodo Crudo Primario / Lodo Activado.</i>	86
FIGURA 5.3.	<i>Cambio del Ph durante el almacenamiento de un Lodo Primario usando diferentes dosis de Cal.</i>	87
FIGURA 5.4.	<i>Ejemplo del Decaimiento del Ph para la Estabilización con Cal después de su filtración por Vacío.</i>	88
FIGURA 5.5.	<i>Efecto del Ph en equilibrio entre el Sulfato de Hidrógeno y Sulfato Ionizado no Volátil.</i>	89
FIGURA 6.1.	<i>Esquematización del Proceso de Conversión Anaerobia de Materia Orgánica Particulada a Metano.</i>	105
FIGURA 6.2.	<i>Tipico Tanque Digestor Standard.</i>	115
FIGURA 7.1.	<i>Balance de Cadmio en Sólidos.</i>	123
FIGURA 9.1.	<i>Tren de Tratamiento propuesto para las Aguas Residuales generadas en la ZMCM.</i>	134
FIGURA 9.2.	<i>Estatigrafía del ex-Lago de Texcoco.</i>	137
FIGURA 9.3.	<i>Estabilización con Cal de los Lodos provenientes del TPA.</i>	139
FIGURA 9.4.	<i>Digestión Anaerobia de los Lodos provenientes del TPA.</i>	140
FIGURA 10.1	<i>Grafica de Sensibilidades</i>	181

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El desarrollo urbano alcanzado en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) es producto de una compleja interrelación de factores políticos, económicos, sociales y culturales; paralelamente es causa y efecto de profundas modificaciones al medio natural que lo sustenta.

En este contexto, el sistema de drenaje y control de avenidas de las aguas pluviales y residuales, ha sido un elemento fundamental en el desarrollo urbano y la transformación del entorno físico, al evitar inundaciones catastróficas en la ciudad, y al coadyuvar al mejoramiento del nivel de vida de sus habitantes. Sin embargo, es un hecho preocupante que las aguas residuales que se producen en el área metropolitana se descargan sin tratamiento previo hacia la cuenca del río Tula, donde son reutilizadas principalmente con fines agrícolas. Esta situación, además de provocar alteraciones en la calidad del agua de las corrientes receptoras, los cuerpos de agua superficial y subterránea, involucra restricciones a los cultivos, así como daños a la salud de la población rural agrícola asentada en las zonas de riego beneficiadas, la cual presenta altos índices de infección parasitaria.

Para enfrentar este problema, existe a nivel gubernamental el Proyecto de Saneamiento del Valle de México, el cual incluye, entre varias acciones, la construcción de cuatro plantas de tratamiento de aguas residuales provenientes de la ZMCM. De ellas, se tiene contemplado localizar la más grande en terrenos del ex-Lago de Texcoco, en el Estado de México, para tratar 44 m³/s a través del método denominado "Tratamiento Primario Avanzado (TPA)", que consiste en la adición de reactivos químicos coagulantes para incrementar la sedimentación de la materia orgánica e inorgánica que contienen estas aguas. El sistema se complementa con la estabilización con cal del producto del tratamiento de las aguas residuales (lodos), el cual será finalmente depositado en terrenos del ex-Lago de Texcoco.

Esta alternativa de tratamiento tiene como fundamento las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el cumplimiento de la Norma Oficial Mexicana (NOM) correspondiente (NOM-001-ECOL-1996). En relación a la contaminación por patógenos, del cual los coliformes fecales se toman como indicadores, el límite máximo permisible para las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores es de 1000 como número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 ml (promedio mensual). En el caso de la descarga al suelo con fines de uso agrícola, se toma en cuenta la contaminación por parásitos. El indicador seleccionado son los huevos de helminto, con un máximo permisible para uso en riego agrícola de 1 huevo de helminto/l en el caso de riego no restringido y de 5 huevos de helminto/l en el caso de riego restringido; esto con el fin de proteger la salud de los trabajadores agrícolas en zonas de riego con aguas residuales y posibilitar la irrigación de diversos tipos de cultivos sin limitaciones.

Sin embargo, existen métodos alternativos de tratamientos de aguas residuales y de estabilización de lodos, como los basados en la digestión anaerobia, cuyos resultados de calidad física, química y biológica cumplen con los parámetros recomendados por la OMS y los límites establecidos por la NOM-001-ECOL-1996, además de enmarcarse dentro de los criterios de sustentabilidad y reducir el impacto al ambiente, al prescindir de la adición de reactivos químicos.

Los objetivos del tratamiento de lodos son el reducir su volumen de vertido y modificar su naturaleza a fin de volverlos inofensivos para el ambiente, lo cual implica separar las fases agua-sólido para hacer su transporte más económico, estabilizar la materia orgánica, destruir los microorganismos patógenos, controlar el problema de malos olores y remover compuestos tóxicos si los hubiere.

Con base en lo anterior, en el presente trabajo se evalúan técnica y económicamente el TPA con la estabilización de lodos con cal y el TPA con la digestión anaerobia de lodos. De los resultados vertidos por estos análisis se propone el diseño de la planta de tratamiento anaerobio de lodos, así como la estructura financiera a la que puede sujetarse dicho proyecto. Es obvio que este estudio parte de la base que el TPA será el seleccionado, como parece indicarlo el convencimiento al respecto de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y las inversiones en plantas piloto que se han efectuado en diversas compañías interesadas en la licitación.

CAPÍTULO 2

MANEJO DEL AGUA EN EL VALLE DE MÉXICO

2.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y GEOGRÁFICAS DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO.

El Valle de México originalmente era una cuenca cerrada, rodeada por montañas, carente de salidas naturales para los escurrimientos superficiales generados en la misma (**FIGURA 2.1.**). Se localiza en la parte sur de la Mesa Central, aproximadamente entre las latitudes norte 19°03'53" y 20°11'09", y las longitudes 98°11'53" y 99°30'24", al oeste del meridiano de Greenwich.

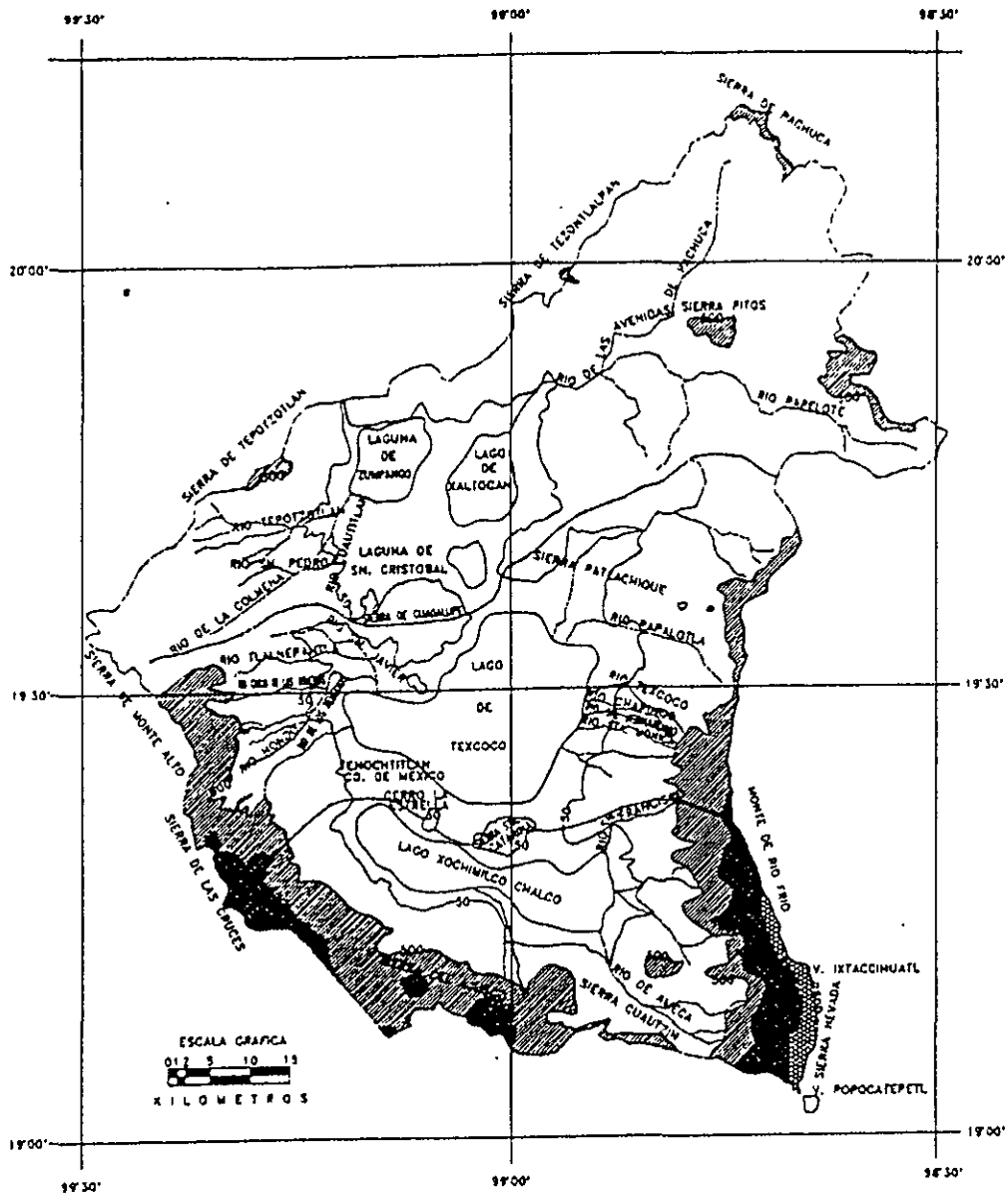
La extensión de la cuenca es de 9,600 km²; sus longitudes máximas se localizan de noreste a sureste con 110 km, y de este a oeste con 80 km. Su superficie pertenece políticamente a los estados de México, Hidalgo, Tlaxcala, mínimamente Puebla, así como al Distrito Federal. Asimismo, cuenta con tres zonas típicas, que son: la zona plana, que corresponde a los antiguos lagos; la zona de lomeríos y la zona montañosa.

Se tienen identificados seis tipos de climas, predominando el templado con sus variantes semiárido y subhúmedo. El clima cambia de árido en el noreste a subhúmedo en la parte suroeste, y en las partes más altas de la cuenca se presentan semifríos y muy fríos.

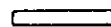




Las precipitaciones pluviales fluctúan entre 385mm y 1,400 mm anuales, aumentando en dirección de norte a sur. La temporada de lluvias es de mayo a octubre, con lluvias aisladas en los meses restantes.

La mayor parte del área se encuentra entre las isoyetas 50-600 y 60-700 mm, que corresponden a la zona donde se localizaban los antiguos lagos, ubicando a las de mayor precipitación (700-1400 mm) en las porciones sur, suroriente y surponiente de la cuenca, distribuidas en las zonas montañosas. Acorde a esta distribución, el volumen promedio anual que se genera es de 6,723 millones de m³.

Los principales ríos, arroyos y canales que tienen influencia en el D.F. y su área metropolitana, son los que están incluidos en las subcuencas hidrológicas denominadas: Xochimilco, Churubusco, Ciudad de México, Cuautitlán, Teotihuacán, Texcoco y Chalco.



SIMBOLOGIA

-  500 M.S.N. DEL VALLE
-  500 A 1000 M.S.N. DEL VALLE
-  1000 A 2000 M.S.N. DEL VALLE
-  2000 M.S.N. DEL VALLE
-  PARTE AGUAS GENERAL DE LA CUENCA

FUENTE: CNA, 1995 (ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DEL SANEAMIENTO DEL VALLE DE MEXICO)

FIGURA 2.1. REGIONALIZACIÓN TOPOGRÁFICA DE LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO.

2.2. INFRAESTRUCTURA DEL DRENAJE DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO.

2.2.1. El desarrollo urbano de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

A principios de siglo, la capital de la República censaba aproximadamente 350 mil habitantes; cincuenta años después, dicha cifra se incrementó ocho y media veces, alcanzando 3 millones de pobladores. Este vertiginoso crecimiento produjo un aumento en la demanda de infraestructura en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México; sus consecuencias propician que en la actualidad, con sus casi 20 millones de habitantes, enfrente los mayores retos para consolidar e impulsar el desarrollo de sus actividades socioeconómicas.

En cuanto a su extensión territorial, la ciudad se ha expandido considerablemente rebasando los límites del Distrito Federal. Su área urbana, que en 1900 ocupaba 21.1 km², alcanzó una superficie de 257 km² en 1950; crecimiento que conformó en 1994, una extensión integrada por 16 delegaciones en el Distrito Federal y 27 municipios en el Estado de México, de 1273 km².

2.2.2. Cauces de escurrimientos artificiales de la Ciudad de México.

Actualmente los escurrimientos superficiales naturales y las aguas residuales (**FIGURA 2.2.**) que se generan en la Zona Metropolitana se descargan de manera artificial hacia el río Tula, en la cuenca del río Pánuco. La descarga artificial se originó con la urbanización paulatina de las zonas lacustres en la época colonial, dando como resultado el sistema de drenaje urbano, constituido por:

- a) el Tajo de Nochistongo, construido en el siglo XVII.
- b) el Gran Canal del desagüe que se construyó a principios del siglo XX.
- c) el Emisor Poniente, construido en los años 60.
- d) el Emisor Central o Drenaje Profundo, construido en la década de los setenta.

Los drenes principales de este sistema son el Emisor del Poniente, el Emisor Central y el Gran Canal. Estos se encuentran constituidos por un gran número de instalaciones, cuya función es la de recibir las descargas de la red primaria, evitar las inundaciones y desalojar las aguas pluviales y residuales fuera de la Zona Metropolitana (**TABLA 2.1.**), para posteriormente ser utilizadas en el riego de cultivos de las zonas de Chiconautla y Zumpango, en el valle, y la mayor parte de ellas en la zona de Tula, fuera de la cuenca, abarcando una extensión de riego de 90,000 hectáreas. Los excedentes escurren a la presa Endhó, sobre el río Tula, afluente del Pánuco.

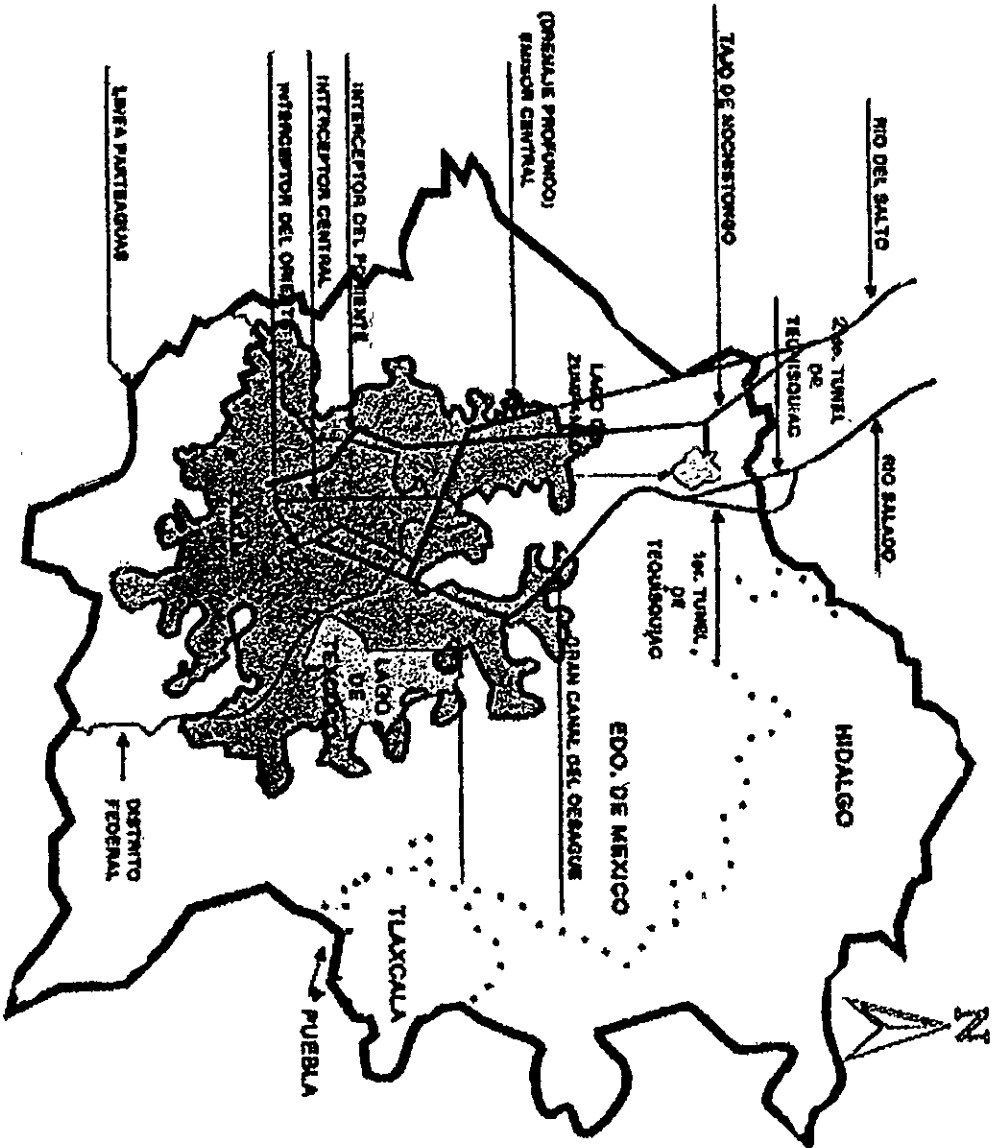


FIGURA 2.2. INFRAESTRUCTURA DEL DRENAGE EN LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

TABLA 2.1. LOCALIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA DEL ALCANTARILLADO DEL VALLE DE MÉXICO.

LOCALIZACIÓN	INFRAESTRUCTURA
Norte	a) Emisor Central. b) la continuación del Emisor del Poniente. c) el Gran Canal. d) los túneles de Tequisquiac.
Sur	a) río de la Compañía. b) Canal de Chalco.
Centro	a) Interceptor central. b) Interceptor centro-centro.
Oriente	a) Interceptor del oriente. b) Interceptor oriente-sur. c) río Churubusco. d) Dren General del Valle.
Poniente	a) Presas de regulación de avenidas. b) Emisor del Poniente. c) Interceptor del Poniente.

CNA, 1996.

2.2.3. Problemática actual.

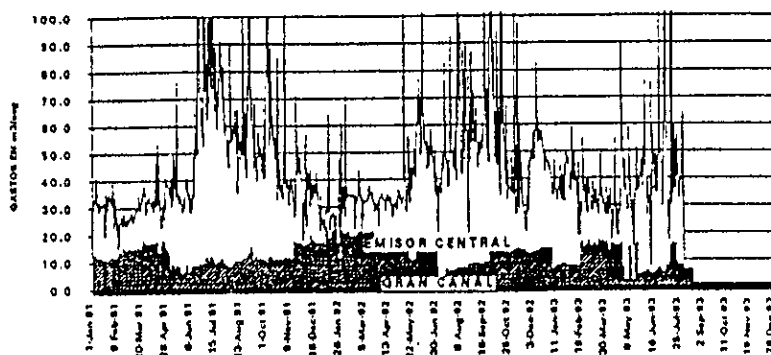
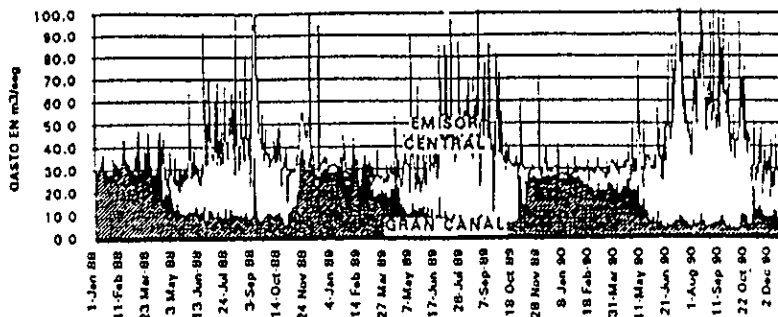
En los últimos años, los escurrimientos hacia el Emisor Central han ido en aumento, mientras que los del Gran Canal han disminuido. Esto ha sido provocado por los hundimientos en los primeros 20 km. de este cauce, lo que ocasiona una disminución de su capacidad de desalojo (**FIGURA 2.3.**).

Este funcionamiento debe ser corregido, ya que impide que el drenaje profundo esté fuera de operación durante el estiaje, condición indispensable para que los túneles tengan mantenimiento.

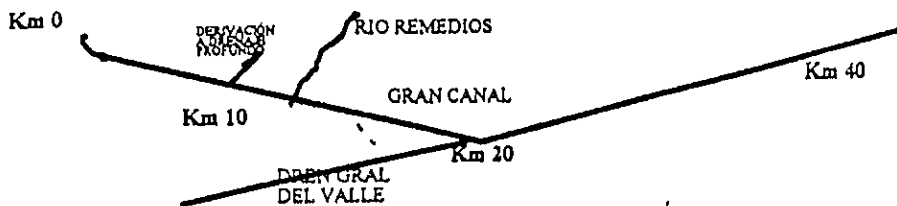
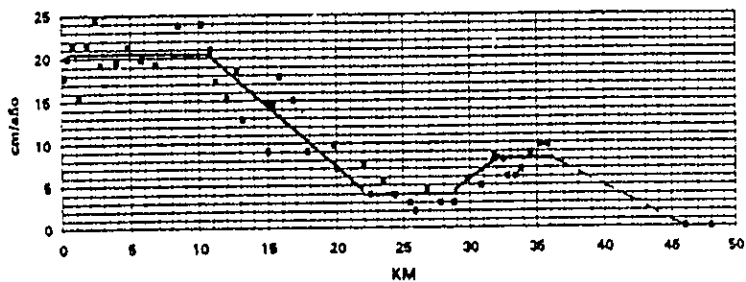
El fenómeno de hundimiento se repite en el Lago de Texcoco y en el Dren General del Valle que lo atraviesa, y que se hunde a mayor velocidad que el Gran Canal donde descarga, lo que comprometerá en el futuro la posibilidad de desalojar los escurrimientos de los ríos Churubusco, de la Compañía y del oriente del lago hacia el Gran Canal.

La situación actual del sistema provoca la incapacidad para desalojar los gastos máximos de lluvias extraordinarias, con el peligro de inundaciones en la ciudad. Por otra parte, es necesario realizar obras que sustituyan al Gran Canal, que por efectos de los hundimientos que sufre a lo largo de su recorrido, en pocos años quedará fuera de servicio.

ESCURRIMIENTOS EN EL GRAN CANAL Y EN EL EMISOR CENTRAL



HUNDIMIENTOS ANUALES PROMEDIO A LO LARGO DEL GRAN CANAL



Fuente: C.N.A. 1996.

FIGURA 2.3. DIAGRAMA DE GASTOS DEL GRAN CANAL

Hoy en día el sistema de drenaje y control de avenidas de la Zona Metropolitana presenta un alto grado de complejidad, determinado principalmente por los factores señalados a continuación:

- La gran extensión de la ciudad.
- El hundimiento del subsuelo en las porciones centro, oriente y sur de la ciudad con afectación a las estructuras superficiales del sistema.
- Las altas intensidades de precipitación pluvial en tiempos cortos.
- La lejanía de los sitios de descarga de las aguas residuales fuera de la cuenca.
- La gran cantidad de elementos que lo integran, como: presas y lagunas de regularización, interceptores profundos, ríos entubados y cauces a cielo abierto, plantas de bombeo, sistemas de colectores y redes de atarjeas.
- El continuo crecimiento de la población y de la mancha urbana.

Estos factores son determinantes en la definición del desarrollo del sistema de drenaje de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, que se llevará a cabo a través del establecimiento de programas de acciones requeridas que garanticen su operabilidad a futuro disminuyendo los riesgos de inundación.

2.3. APROVECHAMIENTO ACTUAL DE LAS AGUAS RESIDUALES.

El agua residual se utiliza fundamentalmente en:

1. Riego de cultivos en la zonas de Chiconautla y Zumpango dentro del Valle, y la mayor parte, en la zona de Tula. En total se riegan 90,000 hectáreas.
2. El agua excedente del riego escurre a la presa Endhó, sobre el río Tula, afluente del río Pánuco.
3. Dentro de la ciudad se reutiliza como riego de parques recreativos como: Chapultepec, San Juan de Aragón y el llenado de los canales de Xochimilco, además para usos industriales como en la planta termoeléctrica del Valle de México.

El volumen total escurrido en el drenaje es de 1,700 millones de metros cúbicos al año, de los cuales:

- a) 1,350 corresponden a los desechos urbanos.
- b) 450 provienen del agua de lluvia.

Los volúmenes de uso del agua residual generada en el Valle de México se presentan en la TABLA 2.2.

TABLA 2.2. USO DEL AGUA RESIDUAL GENERADA EN EL VALLE DE MÉXICO.

USO	VOLUMEN (millones m ³)
• Reusos urbanos.	150
• Evaporación en el Lago de Texcoco.	100
• Directamente en riego (Tula, Chiconautla y Zumpango).	1,200
• Escurrimientos a la Presa Endhó.	250

2.4. CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL.

Los resultados de los análisis de calidad no difieren en general de los normales para aguas residuales urbanas (TABLA 2.3.).

TABLA 2.3. VALORES MEDIOS DE LA CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL DE LA ZMCM.

PARAMETRO	GRAN CANAL	EMISOR CENTRAL
pH	7.88	7.38
Color	304	192
Turbidez	106	93
Alcalinidad Total	618	357
Alcalinidad F	16	13
Dureza Total	252	186
CO ₃	32	26
Conductividad Eléctrica	2052	1047
Cloruro	276	106
Boro	2.06	2.96
SO ₄	105	101
Dureza Ca	129	103
Dureza Mg	117	85
ST	1718	1118
STF	1286	740
STV	457	378
SDT	1447	772
SDF	1166	521
SDV	325	231
SST	252	362
SSF	136	203
SSV	130	159
Sólidos Sedimentables	2.06	2.88
N-NH ₃	22	13
NTK	35	21
N-ORG	11	10
N-NO ₂	0.06	0.05
NO ₃	0.37	1.1
P Total	10	7.7
Fosfatos totales	28	24
Ca Sol.	49	35
Mg Sol.	26	17
Na Sol.	347	163
K Sol.	47	25
Ca Tot.	52	37
Mg Tot.	28	20
Na Tot.	345	163
K Tot.	49	29
Fe Sol.	0.3117	0.2912
Mn Sol.	0.1288	0.1294
Pb Sol.	0.0514	0.0654
Cd Sol.	0.0080	0.0084
Hg Sol.	0.0004	0.0026
As Sol.	0.0011	0.0023

TABLA 2.3. (CONTINUACIÓN)

PARAMETRO	GRAN CANAL	EMISOR CENTRAL
Cr Sol.	0.0125	0.0270
Zn Sol.	0.0367	0.0234
Cu Sol.	0.0176	0.0166
Se Sol.	0.0006	0.0006
Si Sol.	27	24
Fe Tot	4.24	5.79
Mn Tot.	0.1763	0.1992
Pb Tot.	0.0866	0.1467
Cd Tot.	0.0084	0.0108
Hg Tot.	0.0017	0.0034
As Tot.	0.0056	0.0117
Cr Tot.	0.0445	0.0912
Zn Tot.	0.4197	0.3523
Cu Tot.	0.1119	0.1031
Se Tot.	0.0012	0.0008
Si Tot.	33	24
Coliformes Fecales	2.2E+07	1.1E+08
Coliformes Totales	8.6E+07	2.7E+08
DBO Tot.	219	155
DBO Sol.	152	113
DQO Tot.	576	445
DQO Sol.	356	257
Grasas y Aceites	58	83
SAAM	14	8.5

UNIDADES mg/l, excepto pH, Color y Turbidez.
CNA, 1995.

En la época de lluvias no se produce una dilución importante de los contaminantes del efluente, con excepción del nitrógeno amoniacal y los fosfatos. Por otro lado, los SDT y la Conductividad Eléctrica aumentan durante la época de lluvias en el Gran Canal debido al lavado de suelos salinos en la zona cercana a Texcoco.

Esto se explica debido a que el sistema de drenaje recoge las aguas de lluvia de toda la cuenca del Valle de México, con porciones no urbanizadas y con arrastre de suelos, y a que el sistema funciona como sedimentador cuando escurren gastos pequeños y los sedimentos son resuspendidos por los gastos grandes en época de lluvias.

El contenido de metales pesados se encuentra muy por debajo de los límites establecidos para uso del agua en riego.

En cuanto al contenido de parásitos, las mediciones realizadas por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) resultaron en promedio de 160 huevos/l en las aguas del Gran Canal.

2.5. *PROBLEMAS SANITARIOS Y AMBIENTALES PRODUCIDOS POR LAS AGUAS RESIDUALES.*

Los escurrimientos del río Tula, aguas abajo de la presa Endhó provienen del acuífero de la zona, que a su vez es alimentado en más del 90% por la infiltración del agua de riego. Sin embargo, los análisis muestran que las áreas de riego funcionan como una planta de tratamiento avanzado con un proceso de nitrificación de alta eficiencia (CNA, 1995).

De acuerdo con estos análisis, las muestras de algunos pozos y manantiales de la zona, presentan valores de diversos componentes por encima de los admitidos por el agua potable, en particular N de NO₃, coliformes fecales, cloruros, carbono total, magnesio, sulfatos y hierro.

El contenido de nitratos en los pozos y manantiales, especialmente en las fuentes de abastecimiento de agua potable de la zona debe ser cuidadosamente vigilado. Por lo tanto, conviene incorporar un sistema de tratamiento para controlar los nitratos en el agua por potabilizar.

En relación con el riego directo con aguas residuales crudas, el alto grado de enfermedades en la zona es un factor de diseminación de la enfermedad hacia fuera de ella, fundamentalmente hacia la zona metropolitana de la Ciudad de México, debido al flujo de personas y de productos agropecuarios.

Por otro lado, se puede suponer la existencia de problemas de salud animal, pues la ganadería de la zona utiliza como abrevaderos los canales de riego con aguas negras.

La **TABLA 2.4.** muestra los índices obtenidos en estudios sanitarios en las zonas de Tula y Alfajayucan; en el primer caso (Tula), las aguas utilizadas en riego son aguas crudas del Gran Canal y en el segundo (Alfajayucan), han pasado por un proceso de sedimentación en las presas Endhó y Rojo Gómez. De acuerdo con estos datos, es claro el impacto benéfico en los índices de enfermedades parasitarias e infectocontagiosas que tiene el tratamiento natural de las aguas residuales, como resultado de su almacenamiento en el sistemas de presas localizadas sobre el cauce del Río Tula.

En cuanto a la contaminación por metales pesados en los suelos del distrito de riego, la información disponible muestra que después de 80 años de regar con aguas residuales, si bien se pueden detectar aumentos en su contenido, estos se encuentran por debajo de los límites tolerables.

Otro problema causado por las aguas residuales es la proliferación del lirio acuático en el embalse de la presa Endhó, que ha provocado la presencia de plagas de mosquitos. Con la remoción mecánica del lirio y la aplicación de herbicidas e insecticidas se combate actualmente la situación.

2.6. *EVOLUCIÓN DEMOGRÁFICA Y CRECIMIENTO DE LA MANCHA URBANA.*

El crecimiento poblacional de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México evolucionó durante la década 1980-1990 con una tasa promedio menor al 1% anual. Sin embargo, existen fuertes diferencias en las tasas de crecimiento de las delegaciones del Distrito Federal y de los municipios del Estado de México, ya que mientras el primero decreció anualmente a razón de 0.7%, el segundo ha conservado una tasa de crecimiento promedio de 2.76% anual (INEGI, 1990).

TABLA 2.4. ÍNDICES SANITARIOS EN TULA Y ALFAJAYUCAN.

ZONA	INDIVIDUOS ESTUDIADOS	No. DE AFECTADOS	%	FRECUENCIA RELATIVA
NINOS DE 0 A 4 AÑOS				
ÉPOCA DE SECAS				
TULA	341	34	10.0	18
ALFAJAYUCAN	327	2	0.6	1
ÉPOCA DE LLUVIAS				
TULA	335	46	13.7	5.7
ALFAJAYUCAN	356	9	2.5	1
POBLACIÓN MAYOR DE 5 AÑOS				
ÉPOCA DE SECAS				
TULA	759	94	12.4	12.7
ALFAJAYUCAN	809	8	1.0	1
ÉPOCA DE LLUVIAS				
TULA	698	115	16.5	14.4
ALFAJAYUCAN	855	10	1.2	1

CNA, 1991.

2.7. NORMATIVIDAD Y LEGISLACIÓN.

2.7.1. Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

Esta ley faculta al Instituto Nacional de Ecología (INE) a emitir normas oficiales mexicanas que fijan las condiciones que deben cumplir las descargas al medio natural. Para el caso tratado son aplicables las normas: NOM-001-ECOL-1996 (publicada), NOM-002-ECOL-1997 (proyecto) y NOM-003-ECOL-1997 (preparación), que establecen las condiciones que debe cumplir el agua residual tratada usada en riego.

Los preceptos normativos a considerarse en la fase operativa del proyecto tienen fundamento en el Capítulo V, Sección VI, de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, con énfasis en el artículo 37:

- Artículo 37.- Las actividades y servicios que originen emanaciones, emisiones, descargas o depósitos, que causen o puedan causar desequilibrio ecológico o producir daño al ambiente o afectar los recursos naturales, la salud, el bienestar de la población, o los bienes propiedad del Estado o particulares, deberán observar los límites y procedimientos que se fijan en las normas oficiales mexicanas aplicables.

En este contexto, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) emitidas por el Instituto Nacional de Ecología (INE), la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP), de observancia del proyecto en materia de protección de contaminación a los cuerpos de agua son los siguientes:

a) **NOM-001-ECOL-1996**, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el día 6 de enero de 1997.

b) **NOM-002-ECOL-1997**, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales provenientes de la industria, actividades agroindustriales, de servicios y el tratamiento de aguas residuales en sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal. Publicada como proyecto en el Diario Oficial de la Federación el día 9 de enero de 1997.

c) **NOM-003-ECOL-1997**, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales tratadas que se reusen en los servicios públicos, actualmente en elaboración.

Las normas para reúso de agua en riego que se encuentran en proceso de aprobación se apoyan en las recomendaciones de la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos.

Las Normas Oficiales Mexicanas emitidas por el INE y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), de observancia del proyecto para el manejo de los materiales y residuos peligrosos, generados y utilizados en el tratamiento son las siguientes:

Para los lodos que se producirán en las plantas de tratamiento, los cuales son considerados todavía a la fecha como residuos peligrosos en el anexo 2, tabla 5, inciso 5.1 de la NOM-052-ECOL-1993.

d) **NOM-052-ECOL-1993**, 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. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el día 22 de octubre de 1993.

Eventualmente, se dará seguimiento de las normas en materia del confinamiento de los lodos, en caso de que la norma específica para lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales no se publique a tiempo.

e) **NOM-055-ECOL-1993**, requisitos que deben cumplir los sitios destinados al confinamiento controlado de residuos peligrosos, excepto los radioactivos. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el día 22 de octubre de 1993.

f) **NOM-056-ECOL-1993**, requisitos para el diseño y construcción de las obras complementarias de un confinamiento controlado de residuos peligrosos. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 22 de octubre de 1993.

g) **NOM-057-ECOL-1993**, requisitos que deben observarse en el diseño, construcción y operación de celdas de un confinamiento controlado de residuos peligrosos. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 22 de octubre de 1993.

h) **NOM-058-ECOL-1993**, establece los requisitos para la operación de un confinamiento controlado de residuos peligrosos. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 22 de octubre de 1993.

2.7.2. Ley de Aguas Nacionales.

La Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento, se inscriben en el marco de la modernización, planeación y programación de la administración, uso eficiente y racional de las aguas nacionales; es de observancia general en todo el territorio nacional y sus disposiciones son de orden público e interés social. Tiene por objeto regular la explotación, usos o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su calidad para lograr un desarrollo integral y sustentable.

La Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento faculta a la Comisión Nacional del Agua (CNA) a establecer Condiciones Particulares de Descarga (CPD) que deben cumplir las aguas, adicionalmente a las establecidas en las Normas Oficiales Mexicanas, atendiendo a la problemática particular de casos donde se requieran condiciones adicionales o especiales.

2.7.3. Ley Federal de Derechos de Aguas Nacionales.

La Ley Federal de Derechos de Aguas Nacionales establece los derechos y los montos que deberán ser pagados por la prestación de servicios, por el uso o aprovechamiento de los bienes de la nación, como explotación de las aguas nacionales y usos de los cuerpos receptores para las descargas de aguas residuales, así por uso y goce de inmuebles.

Establece que las descargas sin tratar que se arrojen a cuerpos de agua, causarán un derecho federal al utilizarlos para alejar contaminantes, sin perjuicio de las sanciones establecidas en la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente.

2.7.4. Ley de Salud.

La Ley de Salud en sus disposiciones generales, señala la prevención y el control de los efectos nocivos en la salud del hombre, derivados de las aguas residuales y residuos peligrosos que pueden ser arrojadas a los cuerpos de agua.

Por la concepción genérica del Proyecto de Saneamiento de las Aguas Residuales del Valle de México y sus objetivos fundamentales:

- La prevención de riesgos de inundación en la Ciudad de México.
- El control de enfermedades por el uso de las aguas residuales en zonas de riego e infiltraciones en los mantos de abastecimiento de agua potable.

se establece el vínculo en concordancia con las disposiciones de la Ley de Salud y las enmiendas de la Secretaría responsable.

Asimismo, en el Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios, título vigesimoquinto "Efectos del ambiente en la salud", capítulo III "Ingeniería sanitaria y saneamiento básico", se establecen los siguientes artículos de observancia y compatibilidad al proyecto en sus diferentes etapas de desarrollo:

- Artículo 1339.- La Secretaría promoverá y apoyará la realización de obras para disposición de excreta, aguas residuales, manejo de desechos sólidos y mejoramiento sanitario de la vivienda.
- Artículo 1340.- En el caso de aguas residuales, la Secretaría establecerá criterios sanitarios para que su uso, manejo, tratamiento y disposición no constituyan riesgos a la salud humana. Asimismo, determinará los valores máximos permisibles de sustancias peligrosas para la salud en su punto de descarga.
- Artículo 1342.- La descarga de aguas residuales o contaminantes en cualquier cuerpo de agua superficial o subterráneo, cuyas aguas se destinen para uso y consumo humano, debe sujetarse a las normas técnicas que emita la Secretaría. Los usuarios que aprovechen en su servicio aguas que posteriormente sean descargadas a cuerpos de agua destinados al uso y consumo humano, están obligados a darles el tratamiento correspondiente a fin de evitar riesgos a la salud, de conformidad con las disposiciones que al respecto emita la Secretaría.
- Artículo 1343.- La Secretaría y los gobiernos de las entidades federativas en sus respectivos ámbitos de competencia, vigilarán el cumplimiento de las disposiciones sanitarias relativas a aguas residuales.

En la **TABLA 2.5.** se muestra una comparación de estas recomendaciones para riego de larga duración (>20 años) con los valores medios obtenidos en el agua de drenaje del Valle de México. Con relación a los vertidos excedentes a la capacidad de las plantas durante la época de lluvias, en el caso de sistemas de drenaje combinados no existe normatividad vigente.

TABLA 2.5. RECOMENDACIONES DE RIEGO DE LARGA DURACIÓN (>20 años) COMPARADOS CON LOS VALORES MEDIOS EN EL AGUA DE DRENAJE DE LA ZMCM.

PARÁMETRO	RECOMENDACIONES EPA	GRAN CANAL	EMISOR CENTRAL
Aluminio	5.0		
Arsénico	0.10	0.0056	0.003
Berilio	0.10		
Boro	0.75	2.06	1.1
Cadmio	0.01	0.008	0.008
Cromo	0.1	0.0445	0.06
Cobalto	0.05		
Cobre	0.2	0.1119	0.09
Fluor	1.0		
Hierro	5.0	4.24	4.0
Plomo	5.0	0.087	0.08
Litio	2.5		
Manganeso	0.2	0.18	0.168
Molibdeno	0.01		
Niquel	0.2		
Selenio	0.02	0.0012	0.0006
Vanadio	0.1		
Zinc	2.0	0.42	0.35
pH	>6.0	7.9	7.3
SDT	500-2000	1447	772
Cl.residual libre	<1		

UNIDADES mg/l
CNA, 1996.

CAPÍTULO 3

PROYECTO DE SANEAMIENTO DEL VALLE DE MÉXICO

En el marco de la normatividad existente y de acuerdo a los principios de salud pública, el gobierno federal, a través de la Comisión Nacional del Agua (CNA), ha elaborado el Proyecto de Saneamiento del Valle de México. El presente capítulo reproduce los aspectos más importantes del informe final para la realización de dicho proyecto (CNA, 1995).

3.1. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.

El proyecto se fundamenta en la necesidad de prevenir riesgos de inundación de la Ciudad de México y en el hecho de que las aguas negras que se producen en el área metropolitana se descargan sin tratamiento previo fuera del Valle de México, en donde son reutilizadas principalmente con fines hidroagrícolas. Esta situación involucra además la alteración de la calidad del agua de las corrientes receptoras, la contaminación de cuerpos de agua superficial y subterránea, la restricción productiva de cultivos, así como daños para la salud de la población rural-agrícola asentada en las zonas de riego beneficiadas, la cual presenta altos índices de infección parasitaria.

Es así que el proyecto tiene su origen en dos causas fundamentales, que son:

Deterioro en la funcionalidad del actual sistema de drenaje del Valle, lo que implica:

- a) Riesgos de operación.
- b) Riesgos de seguridad de la población.

Uso de aguas negras sin tratar en actividades agrícolas y ganaderas, lo que implica:

- a) Daños a la salud de la población rural-agrícola y urbana.
- b) Restricción de cultivos con efectos en la productividad y producción agrícola.
- c) Contaminación de corrientes y cuerpos de agua superficial y subterránea.

3.2. EFECTOS DE LA IMPLANTACIÓN DEL PROYECTO.

Los efectos esperados son básicamente de carácter correctivo, dado que se pretende alcanzar las siguientes metas:

- a) Rehabilitar el sistema de drenaje para obtener un manejo funcional y controlado de los escurrimientos en el Valle de México, así como de las aguas residuales del área metropolitana, reduciendo los riesgos de inundación.

b) Mejorar la calidad físico-química y bacteriológica del agua servida para fines agrícolas, mediante la construcción de 4 plantas de tratamiento de agua residual que permitan eliminar la presencia de organismos patógenos, principal vector de daño a la salud de la población, pero manteniendo el nivel de aportación de nutrientes (Fósforo y Nitrógeno) indispensables para el sustento productivo de las actividades agrícolas.

c) Como resultados a mediano plazo se prevén:

- Reducción en los niveles de contaminación del agua superficial y subterránea.
- Mejoría en la salud humana y animal.
- Eliminación de restricciones a cultivos específicos.
- Alza en la productividad agrícola.

Los estudios realizados a la fecha incluyen desde la planeación de las obras necesarias, hasta la selección de los sitios idóneos para su implantación, considerando la recopilación, análisis y generación de información cualitativa y cuantitativa de utilidad para los fines de proyecto.

Existe además una evaluación del impacto ambiental del proyecto en sus componentes local y regional, que cumple con la legislación ambiental vigente para las obras de infraestructura hidráulica que por sus características pueden ser generadoras de impactos al ambiente, así como por sus efectos sobre la salud pública, la productividad agrícola, la competencia por el uso del suelo y del recurso hídrico, entre otros aspectos (CNA, 1996).

3.3. ÁREA DE INFLUENCIA DEL PROYECTO A NIVEL LOCAL Y REGIONAL.

El Proyecto de Saneamiento del Valle de México representa uno de los programas hidráulicos más ambiciosos a nivel nacional e internacional, por tratarse tanto de las áreas metropolitana y agrícola más grandes del mundo, que generan y utilizan respectivamente aguas residuales, en donde participan tres entidades que se verán beneficiadas directamente por su implantación: el Distrito Federal, el Estado de México y el Estado de Hidalgo.

El área de influencia a nivel local, se encuentra determinada por las zonas donde físicamente se implantará la obra civil (preparación del sitio y construcción) y se desarrollarán las diferentes actividades para su operación y mantenimiento, involucrando efectos directos en las variables ambientales y programas de desarrollo urbano a nivel municipal, como lo son:

a) Efectos en las variables socioeconómicas locales: empleo y mano de obra, salud pública, riesgos operativos, economía local y uso de suelo.

b) Efectos en las variables naturales: emisión de contaminantes al aire, suelo y agua, alteración de las superficies naturales por la implantación de obras, afectando la flora y fauna presente.

El área de influencia regional (**FIGURA 3.1.**), se encuentra determinada principalmente por los efectos indirectos que se presentarán en las variables ambientales por la operación del proyecto, es decir:

- a) Disminución del riesgo de inundación.
- b) Efectos en el sector salud.
- c) Efectos en los Distritos de riego.
- d) Mejoría de la calidad de los cuerpos superficiales y subterráneos.
- e) Impacto por el transporte de materiales y residuos peligrosos.

3.4. DATOS GENERALES DEL PROYECTO.

La naturaleza del proyecto es la creación y adecuación integral de la infraestructura hidráulica necesaria, para el manejo y saneamiento de las aguas negras que se generan en el Valle de México.

En este contexto, el esquema constructivo-operativo planteado por el proyecto globaliza el triple propósito de reducir el riesgo de inundaciones en la Ciudad de México, proteger la salud de la población en las zonas de riego y levantar restricciones a los cultivos, para lo que se requiere de diversas acciones que permitan llevar a cabo las siguientes componentes del proyecto:

- a) Rehabilitar el sistema de drenaje de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.
- b) Construir y operar 4 plantas de tratamiento de aguas residuales para la Zona Metropolitana.
- c) Realizar acciones de saneamiento en las zonas de riego.
- d) Realizar acciones de desarrollo institucional.
- e) Control de descargas en el drenaje.
- f) Campañas de desparasitación y de educación higiénica.
- g) Realización de estudios, proyectos y monitoreo.

Ante esta situación, se han realizado estudios por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica del Distrito Federal (DGCOH) en donde se plantean las obras necesarias para poder desalojar los caudales provocados por lluvias extraordinarias (lluvia de diseño de 50 años de período de retorno), así como la infraestructura de drenaje necesaria, la cual consiste en dos obras fundamentales: el Túnel del Vaso de Cristo y las obras de entubamiento y bombeo en el nororiente de la ciudad.

3.4.1. Túnel del Vaso de Cristo.

Esta obra consiste en la construcción de un túnel para ampliar la salida del Vaso de Cristo hacia el Emisor del poniente y de esta manera evitar que los escurrimientos de la zona poniente de la ciudad escurran hacia el Drenaje profundo o al Gran Canal, pudiendo utilizar así toda la capacidad del Emisor del Poniente. La localización y el perfil de la obra se muestran en la **FIGURA 3.2.**

Las características del túnel se presentan en la **TABLA 3.1.**

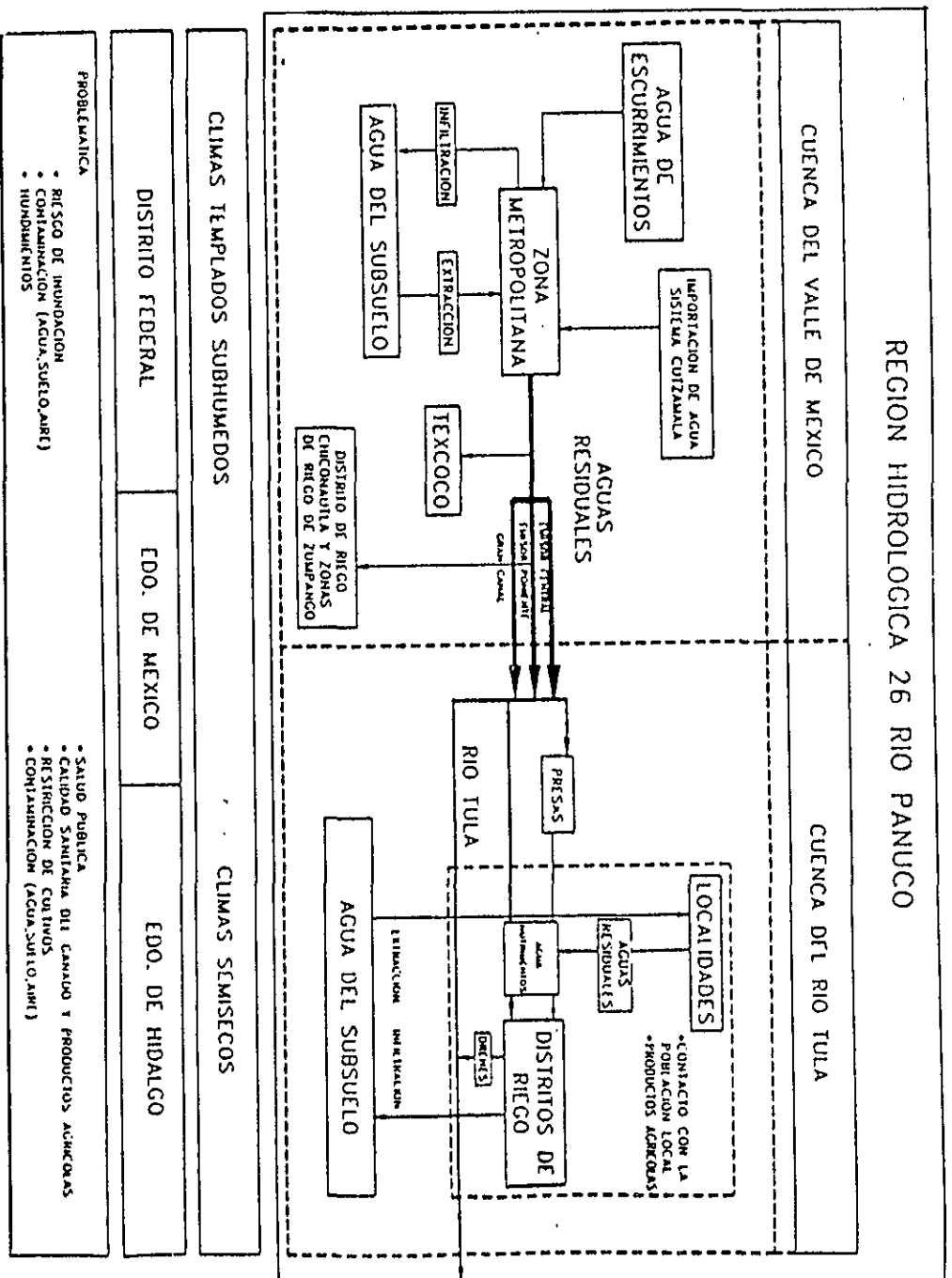
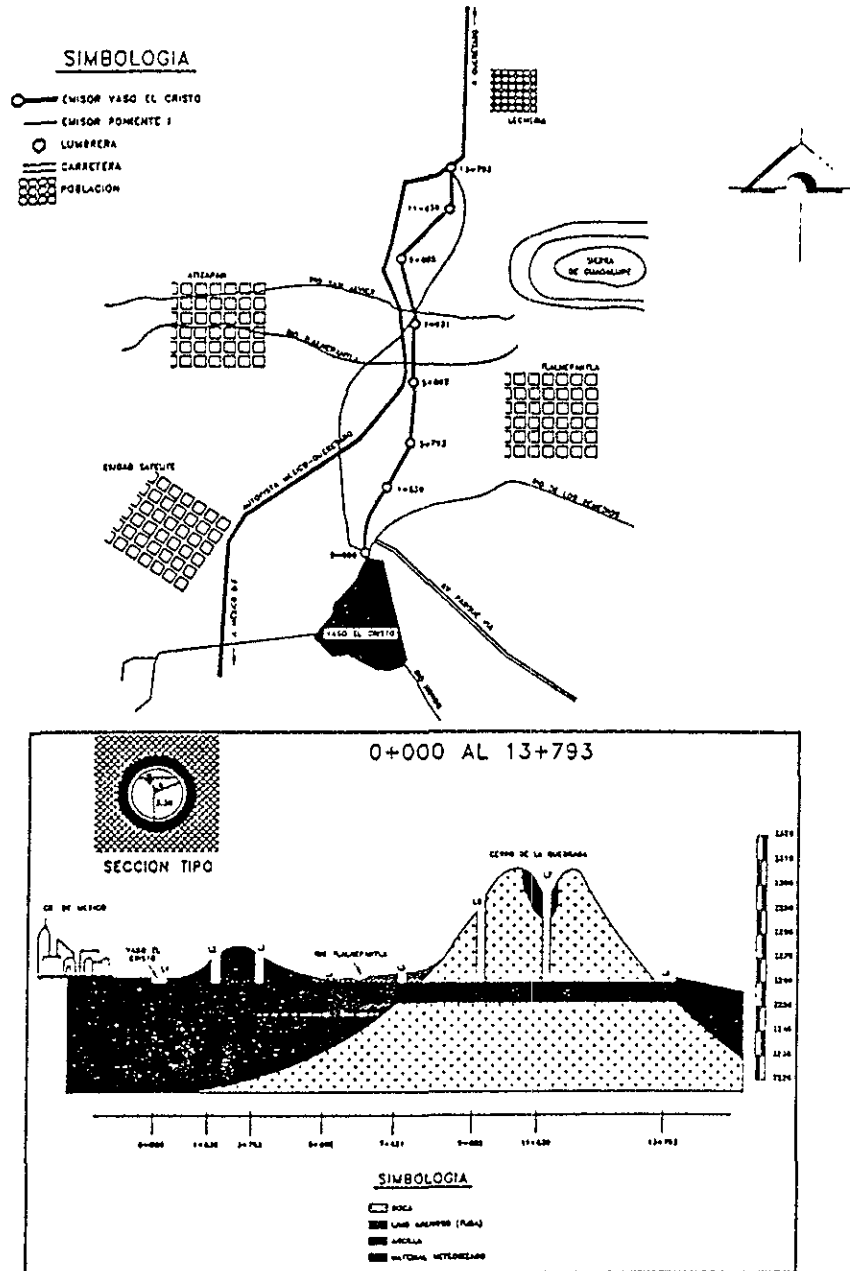


FIGURA 3.1. MODELO CONCEPTUAL DE LA ZONA DE INFLUENCIA DEL PROYECTO



FUENTE: CNA, 1995

FIGURA 3.2. TRAZO DEL TÚNEL DEL VASO DE CRISTO.

TABLA 3.1. CARACTERÍSTICAS DEL TÚNEL DEL VASO DE CRISTO.

CARACTERÍSTICA	(m)
Longitud	13,793
Diámetro	6.6

CNA, 1996.

3.4.2. Obras de entubamiento y bombeo en el Nororiente.

Consisten en el entubamiento del río de los Remedios, entre el Gran Canal y el Dren General del Valle, para conducir las avenidas hacia este último; el entubamiento en túnel de una parte del Dren General; dos lagunas de regulación y dos plantas de bombeo de gran capacidad (FIGURA 3.3.).

Las características principales de las obras de entubamiento y bombeo en el nororiente se presentan en la TABLA 3.2.

TABLA 3.2. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LAS OBRAS DE ENTUBAMIENTO Y BOMBEO EN EL NORORIENTE.

TIPO DE OBRA	CARACTERÍSTICA
Túnel del río de los Remedios	Longitud: 10,048 m. Diámetro: 5.0 m.
Túnel del Dren General	Longitud: 6,666 m. Diámetro: 5.0 m.
Planta de bombeo del Dren General	Gasto: 80 m ³ /s Carga: 28 m.
Planta de bombeo de la Planta de Tratamiento de Texcoco	Gasto: 40 m ³ /s Carga: 15 m.
Laguna de regulación "Casa Colorada"	Capacidad: 15 millones de m ³ Área: 366 ha.
Laguna de regulación "El fusible"	Capacidad: 0.6 millones de m ³ Área: 38 ha.

CNA, 1996.

El manejo de las avenidas extraordinarias, con períodos de retorno hasta de 50 años, obligará a conducir los "picos" de las avenidas provenientes del río de los Remedios y del Dren General a las lagunas de regulación.

Estas obras podrán realizarse de acuerdo con su prioridad en tres etapas, conforme se presenta en la TABLA 3.3.

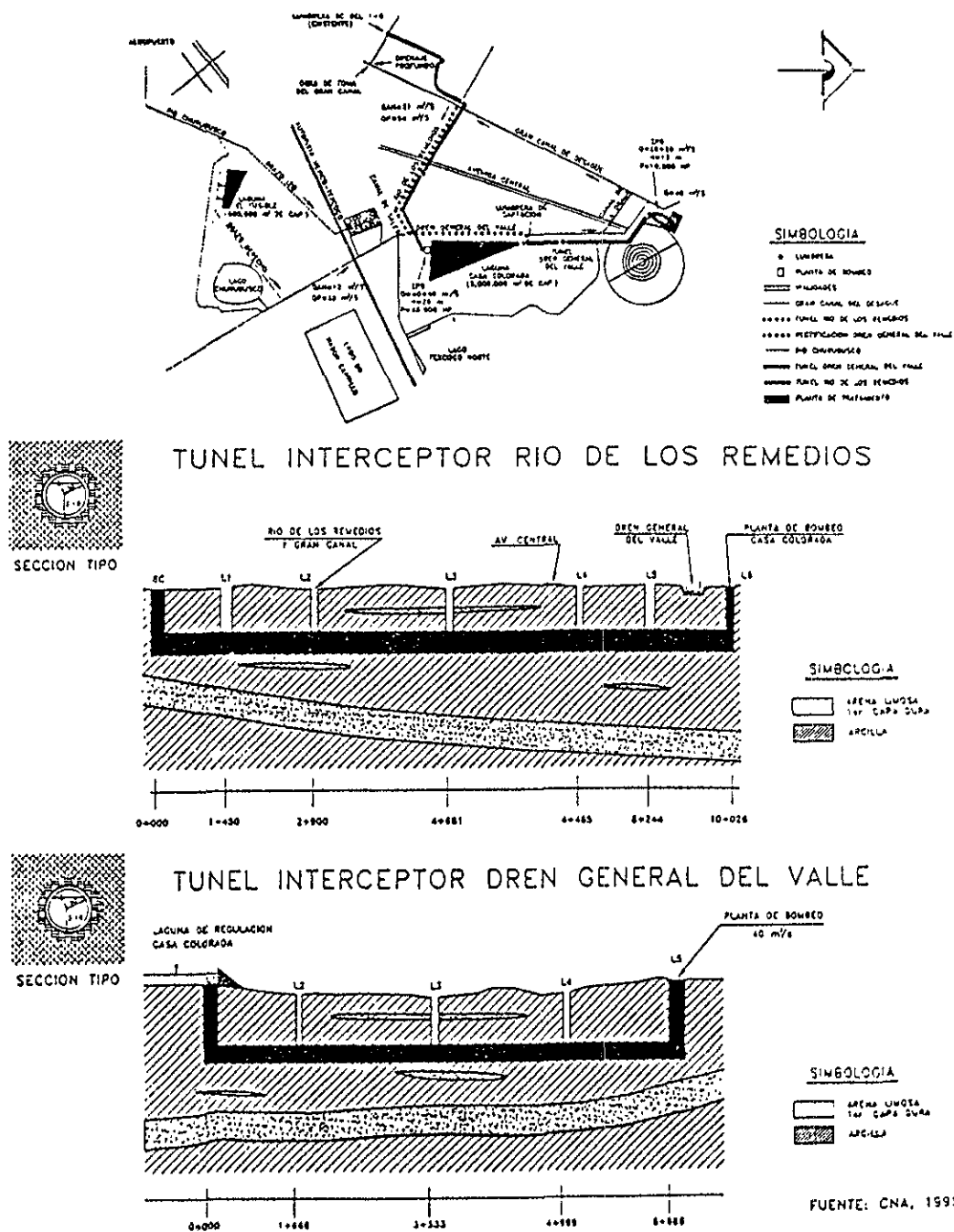


FIGURA 3.3. OBRAS DE ENTUBAMIENTO Y BOMBEO EN EL NORORIENTE

TABLA 3.3. ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN PARA LAS OBRAS DE REHABILITACIÓN DEL SISTEMA DE DRENAJE DEL VALLE DE MÉXICO.

ETAPA	CONCEPTOS
1	<ul style="list-style-type: none"> • Túnel del Drenaje General del Valle • Túnel del río de los Remedios • Planta de bombeo de la planta de tratamiento Texcoco • Primer módulo de la planta de bombeo de la laguna de regulación "Casa Colorada" <ul style="list-style-type: none"> • Rectificación del Dren General del Valle
2	<ul style="list-style-type: none"> • Segundo módulo de la planta de bombeo de la laguna de regularización "Casa Colorada" <ul style="list-style-type: none"> • Laguna de regulación "Casa Colorada" • Laguna de regulación "El Fusible"
3	<ul style="list-style-type: none"> • Construcción del Túnel del Vaso de Cristo

CNA, 1996.

Por otra parte, existe el desarrollo de las obras de Drenaje Profundo, del interceptor oriente y la rehabilitación del interceptor del poniente, que se encuentran en proceso de construcción como parte del programa normal de las obras del Departamento del Distrito Federal (DDF).

3.4.3. Construcción y operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales para el área metropolitana.

Para el tratamiento de las aguas del drenaje de la ciudad es necesario construir grandes plantas de tratamiento para los drenes principales. Éstas se presentan en la TABLA 3.4.

TABLA 3.4. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO.

PLANTA DE TRATAMIENTO	ORIGEN DE LOS ESCURRIMIENTOS	CAUDAL (m ³ /s)
Texcoco Norte	Gran Canal Dren General del Valle	44
Coyotepec	Emisor del Poniente	15
El Salto	Emisor Central	15
Nextlalpan	Municipio de Nextlalpan	0.5

CNA, 1996.

Estas plantas se presentan en la FIGURA 3.4.

3.4.3.1. Eficacia en la remoción de organismos patógenos para diversos tipos de tratamiento.

Las alternativas de tratamiento consideradas por la CNA en el proyecto, tienen como fundamento las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el cumplimiento a la normativa oficial mexicana, en relación al contenido de huevos de helminto (<1 huevo/litro) y adicionalmente menos de 1000 coliformes fecales/100 ml. como promedio mensual y 2000 coliformes fecales/100 ml.

como promedio diario, para proteger la salud de los trabajadores agrícolas en zonas de riego con aguas negras e irrigar cultivos sin restricciones.

La eficacia en la remoción de organismos patógenos para diversos tipos de tratamiento se estima de acuerdo con la **TABLA 3.5.**

TABLA 3.5. REMOCIÓN ESPERADA DE MICROORGANISMOS PARA VARIOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS DE DESECHO.

TIPO DE PROCESO	REMOCIÓN EN UNIDADES LOGARÍTMICAS			
	BACTERIAS	HELMINTOS	VIRUS	QUISTES
Sedimentación Primaria Convencional	0 - 1	0 - 2	0 - 1	0 - 1
Primario Avanzado (b)	1 - 2	1 - 3 (g)	0 - 1	0 - 1
Lodos Activados	0 - 2	0 - 2	0 - 1	0 - 1
Biofiltración	0 - 2	0 - 2	0 - 1	0 - 1
Lagunas Aereadas (c)	1 - 2	1 - 3 (g)	1 - 2	0 - 1
Zanjas de oxidación	1 - 2	0 - 2	1 - 2	0 - 1
Desinfección (d)	1 - 6 (g)	0 - 1	0 - 4	0 - 3
Lagunas de estabilización (e)	1 - 6 (g)	1 - 3 (g)	1 - 4	1 - 4
Efluentes de embalses (f)	1 - 6 (g)	1 - 3 (g)	1 - 4	1 - 4

- (a) En la tabla original no se incluye la filtración.
- (b) Se requiere investigación adicional para confirmar eficacia.
- (c) Incluye laguna de sedimentación
- (d) Cloración u Ozonización.
- (e) El comportamiento depende del número de lagunas y de factores ambientales
- (f) El comportamiento depende del tiempo de retención hidráulica
- (g) Con un buen diseño y operación se puede alcanzar las recomendaciones de la OMS.

FUENTE: GUIDELINES FOR WATER REUSE. EPA/625/R-92. ADAPTADA DE MARA Y CAIRNCROSS, 1989.

Asimismo, uno de los propósitos del método de tratamiento seleccionado es el de remover lo menos posible nutrientes y materia orgánica útil para riego.

3.4.3.2. Procedimientos propuestos para el Tratamiento de las aguas residuales de la Zona Metropolitana del Valle de México.

La Comisión Nacional del Agua (CNA) como parte del proyecto de Saneamiento del Valle de México, propone la construcción de 4 plantas de tratamiento que, basadas en estudios realizados por la misma dependencia pública, resultaron en la proposición del tratamiento primario avanzado (TPA) y de la estabilización con cal de los lodos generados por dicho tratamiento.

3.5. ACCIONES DE SANEAMIENTO EN LAS ZONAS DE RIEGO.

Las acciones de saneamiento en las zonas de riego, que pretende implantar el proyecto, se encuentran estrechamente vinculadas con el uso de las aguas residuales en los distritos de riego y por ende con la problemática que se presenta sobre los cuerpos de agua superficial y subterránea, que repercute en el bienestar de la población usuaria y animal.

Las acciones del proyecto para el saneamiento de las zonas de riego, contempla como solución el esquema combinado de las obras de infraestructura hidráulica para la rehabilitación del sistema de drenaje y la construcción de las plantas de tratamiento previamente descritas.

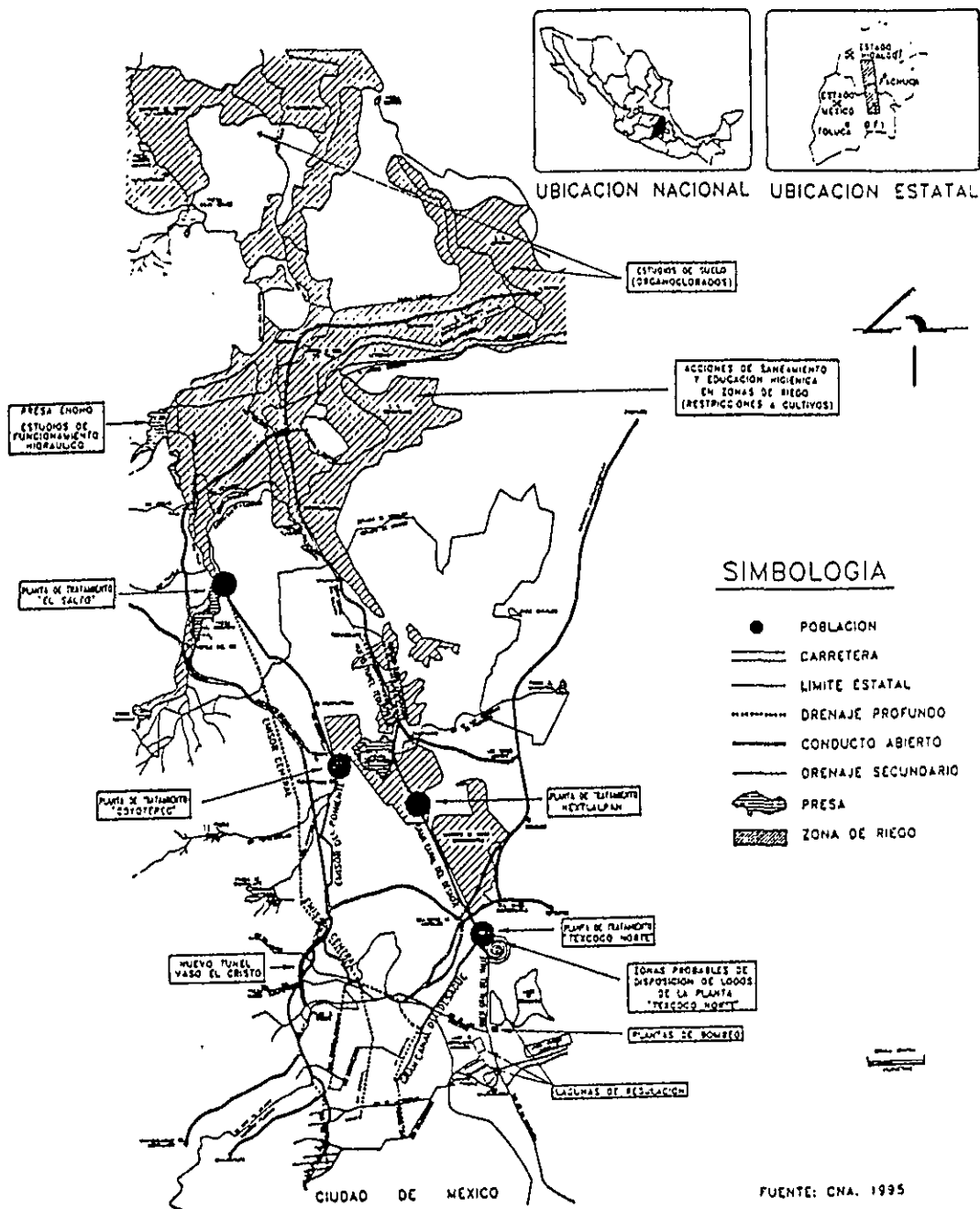


FIGURA 3.4. LOCALIZACIÓN DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO.

Asimismo, con la mejoría intrínseca en la calidad del agua ya tratada previamente a su distribución hacia la zona de riego, se implementará a nivel local, medidas correctivas y preventivas tales como:

- a) Control de descargas y excedentes que escurren fundamentalmente a la presa Endhó y al río Tula.
- b) Posibilidad de tratar un alto porcentaje de estos excedentes a un nivel primario mejorado con coagulación,
- c) Efectuar adecuaciones en la obra de toma de la presa Endhó.

Paralelamente se contempla la posibilidad de incorporar el tratamiento del agua de consumo para controlar los problemas secundarios debidos a contaminación del acuífero o cambiar algunas de las fuentes de abastecimiento. Cabe señalar que los escurrimientos del río Tula, aguas abajo de la presa Endhó, provienen del acuífero de la zona que a su vez es alimentado en más del 90% por la infiltración del agua de riego. Sólo eventualmente recibe descargas del vertedor de la presa en época de lluvias.

Independientemente de las obras locales para el saneamiento y control hidráulico, tanto para aumentar la cobertura de drenaje de los poblados como para tratar sus efluentes, la mejoría de la salud de la población en esas zonas requiere que, además de evitar la contaminación por los patógenos que envía el drenaje de la ciudad, se implementen diversas medidas de desparasitación y de educación higiénica, reforzadas con acciones institucionales específicas. La aplicación de las soluciones viables contemplará a su vez el cumplimiento de la normativa nacional vigente que corresponda a cada caso.

En la **TABLA 3.6.** se presenta un resumen de las acciones previstas.

3.6. ACCIONES DE DESARROLLO INSTITUCIONAL.

Esta componente está concebida para apoyar a los organismos operadores de los sistemas de agua y saneamiento del área metropolitana a mejorar su eficiencia para poder afrontar los costos de construcción y operación de los sistemas, incluyendo los de este proyecto. El DDF ha iniciado un programa en este sentido, teniendo como propósito mejorar la eficiencia y para ello llegar a la concesión del sistema de agua potable. Por lo tanto, esta componente estaría dirigida fundamentalmente a los sistemas de los municipios conurbados del Estado de México.

3.7. CONTROL DE DESCARGAS AL DRENAJE.

Esta componente consiste en el apoyo a los gobiernos del Estado de México y Distrito Federal para el monitoreo y control de las descargas de aguas residuales de sus respectivas redes de drenaje, que permita la identificación de sustancias tóxicas o peligrosas, en cumplimiento de la legislación vigente.

3.8. CAMPAÑAS DE DESPARASITACIÓN Y DE EDUCACIÓN HIGIÉNICA.

Al eliminar la presencia generalizada de patógenos en el agua de riego en la zona, es recomendable realizar una desparasitación para evitar otras vías de diseminación de las enfermedades infecciosas, principalmente hacia la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

TABLA 3.6. PROBLEMAS Y SOLUCIONES CONSIDERADAS PARA EL SANAMIENTO DE LA ZONA DE RIEGO

ORIGEN	PROBLEMA	SOLUCIÓN	CRITERIOS
DESCARGA DE AGUAS NEGRAS A CAUCES NATURALES	Se ocasiona la alteración de la calidad del agua en las corrientes receptoras, principalmente por aspectos microbiológicos.	Rehabilitar los sistemas de drenaje del Valle de México e implantar 4 grandes plantas de tratamiento de tipo primario avanzado.	Con base en muestreos fisicoquímicos y microbiológicos de calidad del agua, pruebas de tratabilidad y normativa nacional e internacional.
USO DE AGUAS NEGRAS EN RIEGO AGRÍCOLA.	Se contaminan cultivos y se imponen restricciones afectando la economía de las localidades. Existencia de cultivos de hortalizas prohibidas.	Mejorar la calidad del agua residual con las plantas de tratamiento, controlar descargas y excedentes que escurren a la presa Endhó y al río Tula, adecuar obra de toma de esta presa.	Con base en muestreos fisicoquímicos y microbiológicos de calidad del agua, pruebas de tratabilidad y normativa nacional e internacional.
USO DE AGUAS NEGRAS EN RIEGO AGRÍCOLA.	Problemas en la salud humana por contacto directo y consumo de agua contaminada. Propagación de enfermedades por la transferencia de productos contaminados.	Mejorar la calidad del agua residual con las plantas de tratamiento. Campañas de concientización sanitaria a la población usuaria.	Con base en muestreos fisicoquímicos y microbiológicos de calidad del agua y normativa nacional e internacional.
USO DE AGUAS NEGRAS EN RIEGO AGRÍCOLA.	Infiltración al subsuelo de las aguas residuales y contaminación del acuífero, principalmente por nitratos.	Se considera incorporar el tratamiento del agua de consumo o cambiar algunas fuentes de abastecimiento e implementar medidas de desparasitación y de educación higiénica.	Con base en muestreos fisicoquímicos y microbiológicos de calidad del agua y normativa nacional.
USO DE AGUAS NEGRAS EN RIEGO AGRÍCOLA.	Problemas de enfermedades en animales por uso de canales como abrevadero.	Campañas de concientización sanitaria a la población usuaria.	Con base en muestreos fisicoquímicos de calidad del agua y criterios ecológicos.

CNA, 1996.

3.9. REALIZACIÓN DE ESTUDIOS, PROYECTOS Y MONITOREO.

Un proyecto de esta naturaleza requiere de un seguimiento cercano sobre sus efectos ambientales, tanto sobre el medio natural como el socioeconómico, a fin de establecer la eficacia de las medidas tomadas. Por ello, se considera necesario la realización de un programa de seguimiento que incluya la aplicación de las medidas de mitigación adecuadas para el control de los impactos ambientales, así como el monitoreo continuo de la evolución de la calidad del agua, de la contaminación de los suelos y cultivos, de los índices de productividad y morbilidad, entre otros aspectos. En el proyecto de financiamiento para estas actividades se considera 5 años.

Adicionalmente se contempla continuar con diversos estudios y proyectos, tales como la investigación de la calidad del agua de la presa Endhó, su evolución y la evaluación del efecto que pudieran tener algunas medidas de corrección.

3.10. CONSIDERACIONES PARA EL MANEJO DE LOS LODOS PRODUCIDOS POR LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL "TEXCOCO NORTE".

Los resultados del tratamiento de las aguas residuales provenientes de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México son:

- Agua tratada con la calidad físico, química y biológica establecidas por las normas nacionales e internacionales correspondientes.
- Lodos donde se concentra la materia removida, cuyas características físicas, químicas y biológicas dependen del tipo de tratamiento de aguas residuales seleccionado.

Para la selección de un sistema de tratamiento integral (agua residual y lodos) es preciso tener en consideración los siguientes aspectos:

- Volumen de agua residual a tratar.
- Características físicas, químicas y biológicas del agua residual a tratar.
- Tecnología existente y económicamente factible para el tratamiento del agua residual, incluidos los lodos.
- Análisis de los requerimientos energéticos, de compuestos químicos y de recursos económicos para que el proyecto sea sustentable a través del tiempo.
- Características geográficas y edafológicas del sitio de disposición de los lodos.

En el caso específico de la Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte" se tiene contemplada la disposición de los lodos en el Vaso del ex-Lago de Texcoco, sitio caracterizado por la salinidad del suelo y el elevado pH que sólo permiten el crecimiento del pasto salado e impiden el desarrollo de algún otro tipo de vegetación que enriquezca al ecosistema.

Por lo tanto, la disposición de los lodos proveniente de cualquier tipo de tratamiento de agua residual, tendrá repercusiones directas sobre las características del suelo del Vaso del ex-Lago de Texcoco, ya que significará la posibilidad servir como acondicionador del terreno y permitir el crecimiento de nuevas especies vegetales, o en su defecto, de empeorar la situación actual y condenar a esa región a servir solamente como confinamiento de los residuos del tratamiento.

Esta situación extrema obliga a un estudio serio y comprometido que permita la evaluación y solución del problema en su conjunto, y no sea origen de uno mayor que ponga en juego la salud y el entorno futuro de millones de mexicanos.

CAPÍTULO 4

TRATAMIENTO DE LODOS

4.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

Los objetivos normales del tratamiento de lodos son el reducir su masa y volumen, así como modificar la naturaleza del lodo a fin de volverlo inofensivo para el medio ambiente. Tratar los lodos implica separar las fases agua-sólido para hacer su transporte más económico, destruir los organismos patógenos, controlar el problema de malos olores y, en su caso, remover compuestos tóxicos. Para llevar a cabo esta actividad es necesario en primer lugar determinar la cantidad y calidad de los lodos.

4.1.1. Calidad de los Lodos

4.1.1.1. Concentración de Sólidos

Es la relación entre el contenido de sólidos y el líquido que los mantiene en suspensión (TABLA 4.1).

$$C_1 = \text{mg de sólidos secos/ L lodo} = \text{mg/L}$$

Cuando las concentraciones son muy elevadas, se expresa la concentración como:

$$C_2 = \text{g de sólidos secos / g lodo} = \text{g/g}$$

Este número multiplicado por 100 se le denomina "porcentaje de sólidos". Este no se refiere a los gramos de sólidos en los gramos de agua. La primera ecuación es una relación masa-volumen, en tanto que la segunda es una relación masa-masa. Si se supone que la densidad de los sólidos es igual a 1, las ecuaciones anteriores se relacionan como sigue:

$$C_1 = \text{mg/L} = 10,000 (\%ST) = C_2$$

4.1.1.2. Tamaño de la Partícula

El tamaño de la partícula afecta directamente la posibilidad de que un lodo pierda el agua que contiene, en especial las partículas entre 1 y 10 micras, de manera que si un lodo tiene una gran concentración de partículas con este tamaño su secado es más difícil. **Kavanaugh et al. (1980)**, desarrollaron la siguiente ecuación:

$$dN/dL = AL^{-\beta}$$

donde:

N = Densidad de la partícula.

L = Tamaño de las partículas.

A y β con características propias de la distribución de las partículas; si $\beta = 1$ las partículas son del mismo tamaño y a medida que se incrementa su valor, la variabilidad de tamaños aumenta.

TABLA 4.1. CONCENTRACIONES TÍPICAS DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN DE LOS LODOS OBTENIDOS POR EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS.

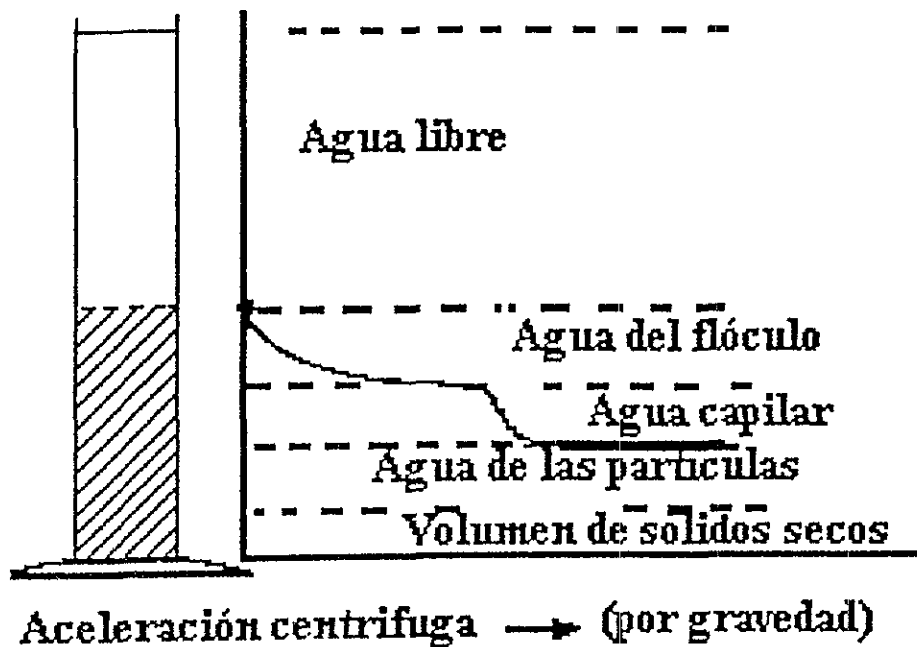
TIPO DE LODO	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN, CONCENTRACIÓN (% DE PESO)
Lodo primario	
• Fresco	2.5 - 5
• Espesado (concentrado)	8 - 10
• Digerido	10 - 15
Lodo de precipitación química	
• Fresco	2 - 5
• Digerido	10
Lodo húmico del filtro percolador	
• Fresco	5 - 10
• Concentrado	7 - 10
Mezcla de lodos del filtro percolador y primario	
• Fresco	3 - 6
• Concentrado	7 - 9
• Digerido	10
Lodo activado	
• Fresco	0.5 - 1
• Concentrado	2.5 - 3
• Digerido	2 - 3
Mezcla de lodos activado y primario	
• Fresco	4 - 5
• Concentrado	5 - 10
• Digerido	6 - 8

Fair y Col, 1968.

4.1.1.3. Distribución del Agua.

Es muy importante saber como se encuentra el agua en los lodos, ya que esto proporciona información para determinar la forma de liberarla del sólido. La **FIGURA 4.1.** muestra un esquema para su clasificación.

FIGURA 4.1. DESCRIPCIÓN DEL ESTADO DEL AGUA DE LOS LODOS COMO EXTRACTO POR ACELERACIÓN CENTRÍFUGA.



donde:

a) Agua libre: es el agua que se libera al sedimentar las partículas por acción de su propio peso. Esta agua no se encuentra ligada a las partículas y es la que durante el tratamiento se libera por sedimentación y espesamiento de los lodos.

b) Agua del floculo: es el agua atrapada en los floculos formados y cuya liberación se logra al comprimirlos. En tratamiento de agua esto corresponde al agua que se elimina por compresión mecánica.

c) Agua capilar: es el agua contenida en los floculos y que está unida a ellos por fuerzas capilares; no se remueve por medios mecánicos a menos que se apliquen presiones muy elevadas.

d) Agua de las partículas: es el agua que forma parte de la composición química de las partículas y su eliminación se logra sólo por modificación de la estructura de las mismas.

4.1.1.4. Propiedades del Fluido.

Una herramienta fundamental es la caracterización de lodos, con base en sus propiedades físicas como fluido. De acuerdo a este criterio, se pueden distinguir 4 categorías (Colin, 1983):

- a) Lodos líquidos.- cuando el lodo fluye por influencia de la fuerza de gravedad.
- b) Lodos plásticos.- cuando el lodo está tan concentrado que no fluye libremente y se deforma constantemente al ejercer una presión. Estos lodos pueden ser bombeados.
- c) Lodos sólidos susceptibles de ser compactados.- es el lodo demasiado espeso y que no se puede bombear. Su volumen aun decrece a medida que se secan.
- d) Lodos con volumen constante.- el lodo no está saturado con agua y se seca sin mayor reducción de volumen.

4.1.1.5. Propiedades de Sedimentación.

Los lodos normalmente son muy concentrados, por lo que presentan características de decantación por zona; es decir, las partículas del fango no se decantan con su velocidad individual libre de sedimentación, sino que la velocidad de sedimentación se reduce considerablemente debido a la presencia y a la interferencia de las partículas colindantes.

Además de la resistencia del fluido a la sedimentación, las fuerzas interpartículas también pueden disminuir la velocidad de sedimentación del lodo.

La FIGURA 4.2. ilustra que la velocidad de sedimentación depende grandemente de su concentración y que se obtienen elevadas diferencias entre los distintos lodos. También existen diferencias significativas entre distintos lodos dentro del mismo tipo de proceso de tratamiento.

4.1.1.6. Olor.

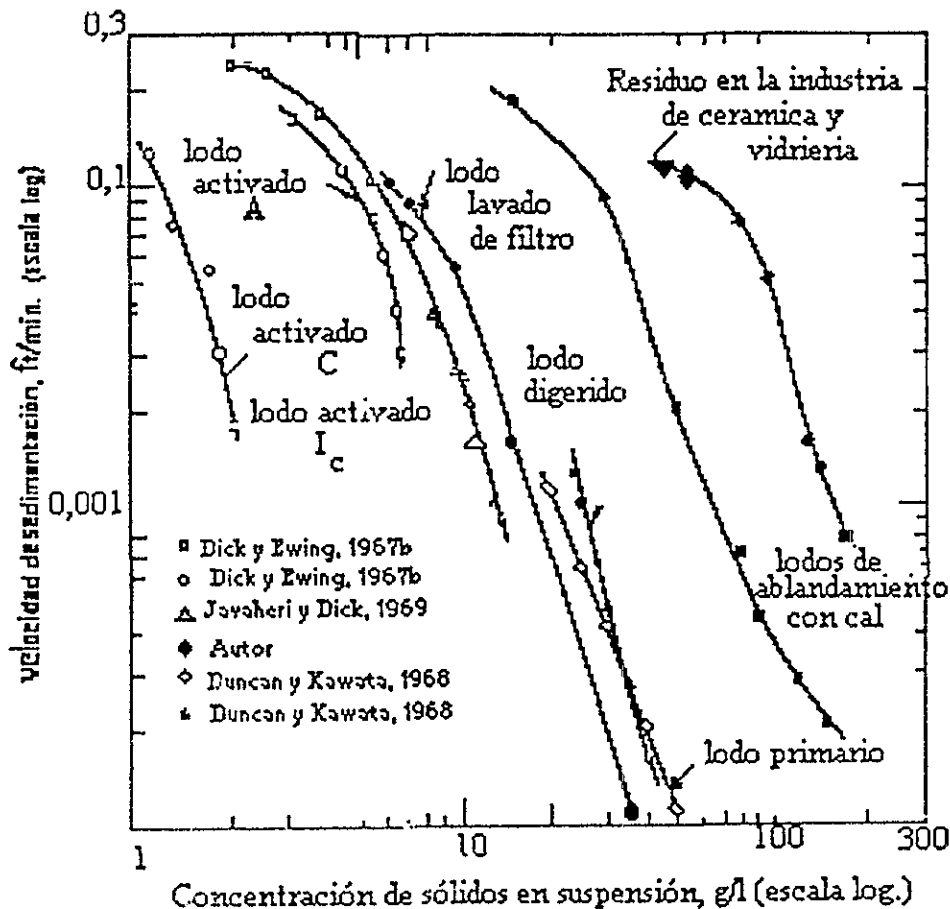
Este parámetro subjetivo es empleado aun cuando se tienen grandes dificultades para su medición. El método más adoptado es el del olfatómetro dinámico, que permite efectuar mediciones en campo, al definir al olor como:

$$NEOP = (\log_{10} C \cdot S) / C_1$$

donde:

- NEOP = Número específico de olor personalizado.
- C = Concentración del olor contenido en los gases.
- C₁ = Umbral de detección para el gas en determinación.
- S = Sensitividad individual.

FIGURA 4.2. VELOCIDADES DE SEDIMENTACIÓN PARA UN RANGO DE CONCENTRACIONES Y UNA VARIEDAD DE LODOS.



Dick and Ewing, 1967.

Si el caudal del aire sin olor que suministra el olfatómetro es Q_1 y el del gas que tiene el olor es Q_2 se puede demostrar que:

$$NEOP = \log_{10} S (Q_1 + Q_2) / Q_2$$

donde:

S se define como: $S = C_m / C_t$, con frecuencia tiene un valor de 5.

C_m = umbral medido para una persona empleando un gas de propiedades conocidas como el ácido sulfhídrico.

C_t = umbral establecido en la literatura.

4.1.1.7. Propiedades Biológicas.

El contenido de organismos patógenos es una de las propiedades más importantes en el tratamiento de lodos cuando se pretende su disposición en suelo agrícola. Las propiedades biológicas de un lodo dependen de la naturaleza de sus constituyentes orgánicos, del contenido suficiente de nutrientes y factores de crecimiento, y de la toxicidad de los materiales presentes en el lodo. La *E. Coli* se emplea con frecuencia como un indicador de contaminación; sin embargo, no puede servir para evaluar patógenos en lodos. Para ello se ha recomendado usar *Salmonella* como un organismo indicador (Colin, 1983).

4.1.1.8. Tóxicos.

Se encuentran formados por dos grupos:

- a) Inorgánicos: compuestos por los metales pesados.
- b) Orgánicos: los más comunes son los PCB y los hidrocarburos policlorados.

4.1.1.9. Propiedades Químicas.

Las características químicas son de interés para evaluar el efecto de los métodos de vertido final de lodos en el suelo, aire y agua, para considerar su posible utilidad y para evaluar la aplicabilidad de los procesos de tratamiento de lodos. En general, la naturaleza química de los lodos no ha sido bien caracterizada, debido a la diversidad de sus tipos y a que la mayoría de análisis publicados se han referido a la fracción sólida de los lodos.

El mayor interés sobre las propiedades químicas de los lodos está en relación con su aplicación en el suelo y su valor fertilizante.

4.1.1.10. Drenabilidad.

La drenabilidad es muy importante, ya que el contenido de agua de un lodo se relaciona directamente con la necesidad de transporte, de secado o la posibilidad de incineración. Actualmente, para eliminar el agua de los lodos se emplean tres mecanismos:

- Filtración.
- Centrifugación.
- Evaporación.

Debido a que cada método emplea principios de operación diferentes, la forma en que se mide la drenabilidad de un lodo es diferente. Para la filtración lo que más se emplea es la resistencia específica a la filtración, aun cuando no es un método reconocido por los Métodos Estándar.

4.1.1.11. Propiedades Deshidratantes.

Los procesos de filtración al vacío, centrifugación y secado con lecho de arena son el sistema de deshidratación más utilizado hasta ahora en el tratamiento de lodos provenientes de la depuración del agua. La deshidratación de los lodos depende de factores tales como: la concentración, tamaño, forma y características superficiales de las partículas, viscosidad, fuerza iónica y pH del agua.

4.2. CANTIDAD DE LODOS.

La cantidad de lodos producidos es función de varios factores, entre los cuales se encuentran los siguientes:

- Empleo de drenajes combinados o separados.
- Tipo del proceso del cual provienen y forma de operación.
- Forma en que son calculados y expresados los valores.

De acuerdo con la etapa del proceso, se distinguen las producciones de lodo mostradas en la TABLA 4.2.

TABLA 4.2. CANTIDAD DE LODOS PRODUCIDOS DE ACUERDO CON EL TIPO DE PROCESO.

ORIGEN	PRODUCCIÓN (g de sólido seco / m ³ de agua tratada)
Sedimentación Primaria	150
Lodos Activados	85
Aereación Extendida	100
Filtración	15
Tratamiento Primario Avanzado	
• Concentración baja (350-500 mg/l de SST)	300
• Concentración alta (800-1.600 mg/l de SST)	800

Metcalf and Eddy, 1991.

La TABLA 4.3. muestra algunos de los factores empleados para calcular teóricamente la producción de lodos en una planta.

4.3. ESTABILIZACIÓN DE LODOS.

El acondicionamiento de lodo se refiere a los métodos físicos y químicos utilizados para alterar las propiedades del lodo con el fin de eliminar el agua más fácilmente. En general, el objetivo consiste en transformar la masa de lodo gelatinosa y amorfa en un material poroso que libera fácilmente agua.

Por otro lado, al proceso de tratamiento de lodos con frecuencia se le denomina "estabilización". La EPA define con este término la acción de reducir "en forma significativa el contenido de patógenos" o "reducir en un determinado porcentaje el contenido de sólidos volátiles". Cabe mencionar que el reducir patógenos no implica mejorar las características del lodo en cuanto a olor, toxinas y drenabilidad de tal forma que aun cuando un lodo esté libre de patógenos puede significar un impacto

negativo para el medio ambiente; algo similar ocurre si se emplea sólo el contenido de sólidos volátiles como parámetro de la estabilización. La Comunidad Económica Europea (CEE) define al lodo estabilizado como aquel que ha recibido el suficiente tratamiento químico o biológico para un almacenamiento a largo plazo. Otra definición es la aportada por Vesilind *et al.* (1985), el cual define un lodo estable como aquel que puede ser usado o dispuesto sin daño posterior al medio ambiente o a la salud humana.

4.3.1. Evaluación de la Estabilidad.

En general, se entiende por lodo estabilizado en su sentido más amplio aquel que:

1. No tiene olor ni potencial de producirlo.
2. No contiene organismos patógenos.
3. Carece de compuestos químicos tóxicos.
4. Presenta en las condiciones finales del tratamiento (con o sin deshidratación) la posibilidad más económica para su disposición final.

TABLA 4.3. FACTORES PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS LODOS EN UNA PLANTA DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

FACTOR	SIGNIFICADO	VALOR
px	Fracción de sólidos fijos que se remueven en el pretratamiento (rejillas y desarenador).	0.04
pz	Fracción de sólidos volátiles que se remueven en el pretratamiento (rejillas y desarenador).	0.1
cx	Fracción de sólidos fijos que se remueven en un sedimentador primario y que conforman parte de los lodos primarios.	0.67
cz	Fracción de lodos volátiles que se remueven en un sedimentador primario y que forman parte de los lodos primarios.	0.42
fx	Fracción de sólidos fijos que se remueven en un sedimentador secundario de lodos activados.	0.7
fz	Fracción de sólidos volátiles (incluye biomasa producida por la transformación de la DBO en sólidos) que se remueven en un sedimentador secundario.	0.9
dx	Fracción de sólidos fijos que se remueven en un digestor anaerobio.	0.3
dz	Fracción de sólidos volátiles que se remueven en un digestor anaerobio.	0.4
vz	Fracción de sólidos volátiles que se destruye en un digestor anaerobio.	0.4
nx	Fracción de sólidos fijos que se remueven por deshidratación con centrifuga, expresada como lodo deshidratado.	0.9
nz	Fracción de sólidos volátiles que se remueven por deshidratación con centrifuga, expresada como lodo deshidratado.	0.8

Vesilind *et al.*, 1985.

Los parámetros que se emplean para medir la estabilidad de un lodo dependen del tipo de tratamiento a que se someta, ya sea físico, químico y/o biológico.

Dentro de los índices de estabilidad algunos autores han conjuntado los parámetros de los diversos tratamientos con el fin de crear un índice de estabilidad común, encontrándose los sólidos volátiles como una de las determinaciones más importantes. La **TABLA 4.4.** muestra las diferentes técnicas de estabilización. Es de resaltar que con ninguna de ellas logran todos los objetivos, así que la selección depende de la disposición final de los lodos. Por ejemplo, si el terreno de disposición es una zona aislada y lejana, la eliminación de patógenos no tiene sentido.

TABLA 4.4. APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN DE LODOS.

MÉTODO	REDUCCIÓN DE OLORES	ELIMINACIÓN DE PATÓGENOS	REMOCIÓN DE TÓXICOS	DRENABILIDAD
Digestión anaerobia.	+	+	+ ^b	+ ^c
Digestión aerobia.	+	+	0	+ ^c
Tratamiento con cal.	+	+	+ ^d	+
Estabilización rápida con cal viva.	+	++	+++ ^d	+
Composteo.	+	+	0	NA ^e
Lagunas.	0	+	0	+ ^c
Cloración.	+	++	0	+
Irradiación.	0	++	0	0
Pasteurización.	+	++	0	+
Secado.	++	++	0	NA
Incineración.	++	++	0	NA

Notación: - efecto negativo; 0 no efectivo; + algo efectivo; ++ muy efectivo; NA no aplicable.

^b remoción en el sobrenadante.

^c lechos de arena.

^d eliminación de metales solubles.

Vesilind, *et al.*, 1985.

4.4. TÉCNICAS DE ESTABILIZACIÓN.

4.4.1. Digestión Anaerobia.

El primero en emplear la digestión sin aire de los desechos orgánicos para producir humus fue Karl Imhoff en los inicios del siglo XX. El proceso depende de la agrupación de un gran número de microorganismos clasificados en dos grupos:

- a) Los formadores del ácido.
- b) Los formadores del metano.

El proceso se describe de manera detallada en el Capítulo 6 "Digestión Anaerobia de Lodos".

Las bacterias generadoras de metano son anaerobias estrictas, muy sensibles a los cambios del ambiente y de crecimiento lento. El tiempo de retención celular se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\theta = SD/SP$$

donde:

SD = sólidos contenidos en el digester (kg de sólido seco).

SP = cantidad de lodos por día introducidos al reactor.

A 35°C, la retención debe de ser al menos de 10 días para que ocurra una digestión adecuada y con frecuencia varía entre 10 y 20 días. A temperatura ambiente se puede operar hasta 60 días.

El pH de un digester deber ser mantenido entre 6.5 - 7.5, lo que se logra al contar con la suficiente alcalinidad en el medio. La FIGURA 4.3. muestra la alcalinidad en función del CO₂ producido, que es otro de los parámetros utilizados para la supervisión del proceso. Cuando la fracción del CO₂ es menor a 25% o excede 45%, es indicativo de que hay problemas en el reactor.

Los problemas principales de operación son la falta de mezclado, ya que se estima que entre el 25 y 50% del reactor se encuentra en zona muerta, y la formación de sólidos en el sobrenadante es de difícil eliminación. Típicamente, los digestores tienen una cubierta flotante ajustable a la producción de gas. Los criterios de diseño se muestran en la TABLA 4.5.

FIGURA 4.3. RELACIÓN ENTRE EL CO₂ COMO GAS DIGESTOR Y EL BICARBONATO ALCALINO.

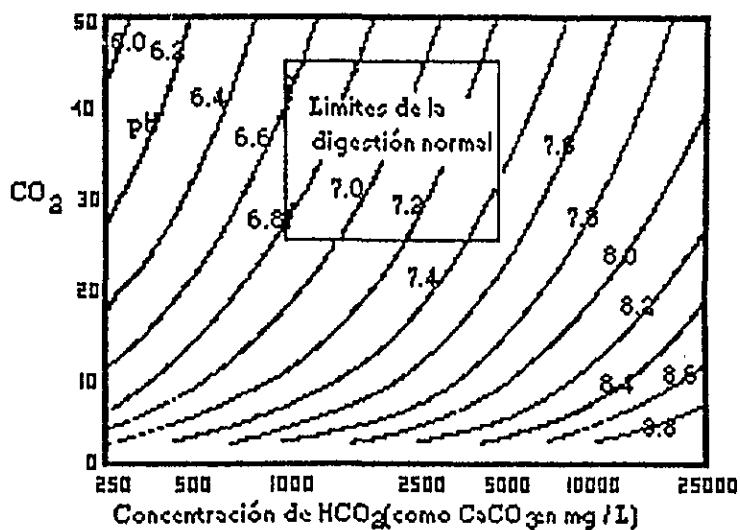


TABLA 4.5. CRITERIOS TÍPICOS PARA DIGESTORES ANAEROBIOS.

PARÁMETRO	VALOR
• Temperatura	35°C
• Tiempo de retención (días)	10 a 20
• Carga másica, (kg/m ³ *s)	1.5 a 3.2
Volumen, (l/hab)	
• Lodos primarios	40 a 60
• Lodos primarios + lodo de filtros percoladores	80 a 100
• Lodos primarios + lodos activados	80 a 110

Metcalf and Eddy, 1991.

Los digestores reducen el contenido de los sólidos volátiles entre el 40 y el 45%, la reducción de los patógenos es mostrada en la **TABLA 4.6.**

TABLA 4.6. REMOCIÓN DE PATÓGENOS EN UN DIGESTOR ANAEROBIO.

BACTERIA	TIPO DE DIGESTIÓN (días)	TEMPERATURA (°C)	REMOCIÓN (%)	COMENTARIOS
Endoamoeba hystolitica	12	35	< 100	La reducción se logra a más de 20°C.
Salmonella typhosa	20	35	90	85% de reducción con un tiempo de 6 días.
Tubercle bacilli	35	35	85	La digestión no lleva a una total eliminación.
Escherichia Coli	49	35	< 100	La mayor parte de las poblaciones se eliminan.

EPA, 1996.

4.4.2. Digestión Aerobia.

El objetivo de este proceso es destruir con ayuda del oxígeno los sólidos formados durante un proceso biológico. El proceso consiste en someter a los lodos a una aireación prolongada, generalmente 15 días. La edad de los lodos que se usa es de alrededor de 15 días, con una carga de masa de 0.16 kg/m³•día (Metcalf and Eddy, 1993). Se emplea comunmente para lodos provenientes de lodos activados por la similitud del proceso y se evita en lodos primarios por el elevado tiempo de retención. La **FIGURA 4.4.** muestra un sistema de digestión aerobia típico.

La reducción de sólidos volátiles se sitúa entre el 50 y 60%. Los sobrenadantes que se producen son claros y con baja DBO, por lo que su regreso a la planta de tratamiento no causa ningún problema. La **TABLA 4.7.** muestra los principales parámetros de diseño.

FIGURA 4.4. DIGESTIÓN AEROBIA.

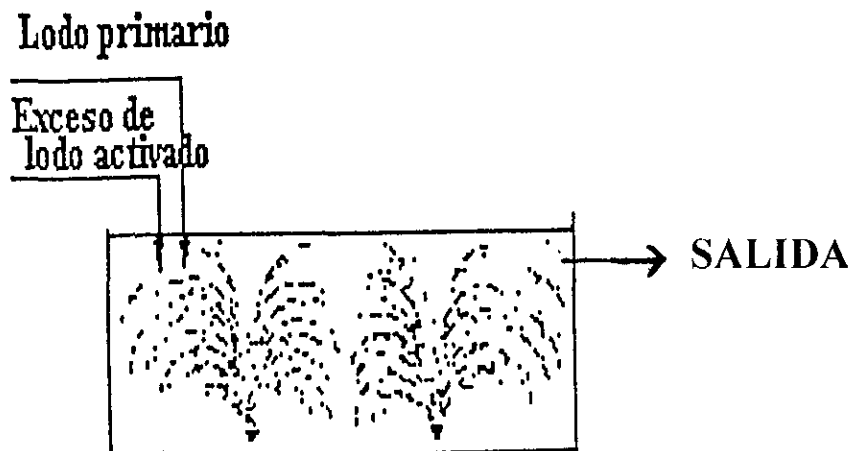


TABLA 4.7. CRITERIOS DE DISEÑO DE LOS REACTORES DE DIGESTIÓN AEROBIA DE LODOS.

PARAMETRO	VALOR	COMENTARIO
• Tiempo de retención de sólidos (días).	10 a 15 ^a 15 a 20 ^b	En función de la temperatura y tipo de inóculo.
• Volumen requerido, (l/habitante).	85 a 113	
• Carga de SSV (kg/m ³ *día)	1.60 a 4.80	En función de los requerimientos de temperatura.
• Requerimientos Energéticos. Aeración Mecánica (kW/1000 m ³) Aeración por Difusión (m ³ /m ³ *min)	20 a 40 0.02 a 0.04	
• Contenido mínimo de oxígeno disuelto (mg/l)	1.0 a 2.0	
• Temperatura (°C)	> 15	Para temperaturas menores es necesario incrementar el tiempo de retención hidráulica.
• Reducción de SSV (%)	35 a 50	
• Diseño del reactor		Generalmente son tanques abiertos sin aislamiento. Para sistemas pequeños (4 l/s), el diseño debe ser flexible para que el reactor sirva a la vez como espesador.

^a Sólo para purga de lodos activados.

^b Con lodos primarios que pueden incluir secundarios.

Metcalf and Eddy, 1991.

4.4.3. Secado.

Se emplea energía térmica para evaporar el agua y producir un lodo desinfectado, sin olor y baja humedad (5 al 10%). No hay duda que el secado produce un producto muy fino pero de alto costo y escasa comercialización ya que muchos municipios han fallado ésta práctica. Además, la formación de un aerosol explosivo puede ocasionar accidentes.

4.4.4. Incineración.

Es el método más completo para la estabilización del lodo. La oxidación total del contenido orgánico, controla tanto a los patógenos como a los olores. La composición de lodos es determinante para la aplicación de este proceso, ya que interviene el contenido calorífico (TABLA 4.8.), así como la concentración de metales pesados, compuestos tóxicos y refractarios, que son contaminantes en los gases de combustión. Adicionalmente, durante el proceso también se pueden producir otros contaminantes como es el caso de las dioxinas. La FIGURA 4.5. representa esquemáticamente el proceso básico de la incineración de lodos. El proceso consiste en la degradación térmica a alta temperatura para producir cenizas inertes y reducir el volumen en un 90%. A pesar de que hay muchos diseños de incineradores, los que funcionan mejor son los de cámaras múltiples y el de lecho fluidizado (FIGURA 4.6.).

TABLA 4.8. VALOR CALORÍFICO DE ALGUNOS LODOS.

MATERIAL	COMBUSTIBLES (%)	CONTENIDO CALORÍFICO (kJ/kg de sólido seco)
• Grasa y natas	88	38 800
• Lodos primarios	74	23 900
• Lodos de rejillas finas	86	20 900
• Lodo sedimentado secundario	85	19 000
• Lodo digerido	60	12 300
• Lodos de tratamiento físico-químico	57	17 400
• Arena	33	9 200

Owen, 1957.

FIGURA 4.5. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL PROCESO BÁSICO EN LA INCINERACIÓN DE LODOS.

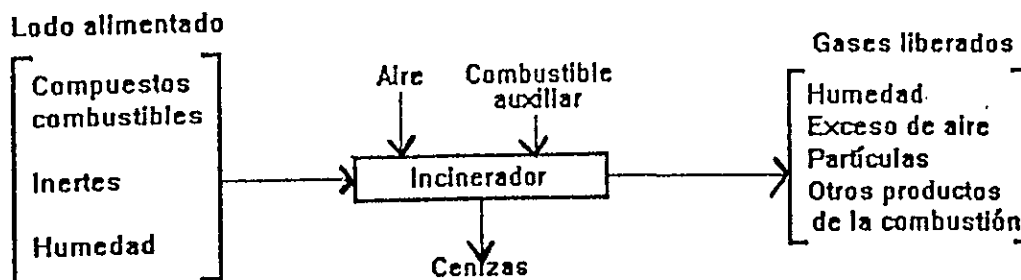
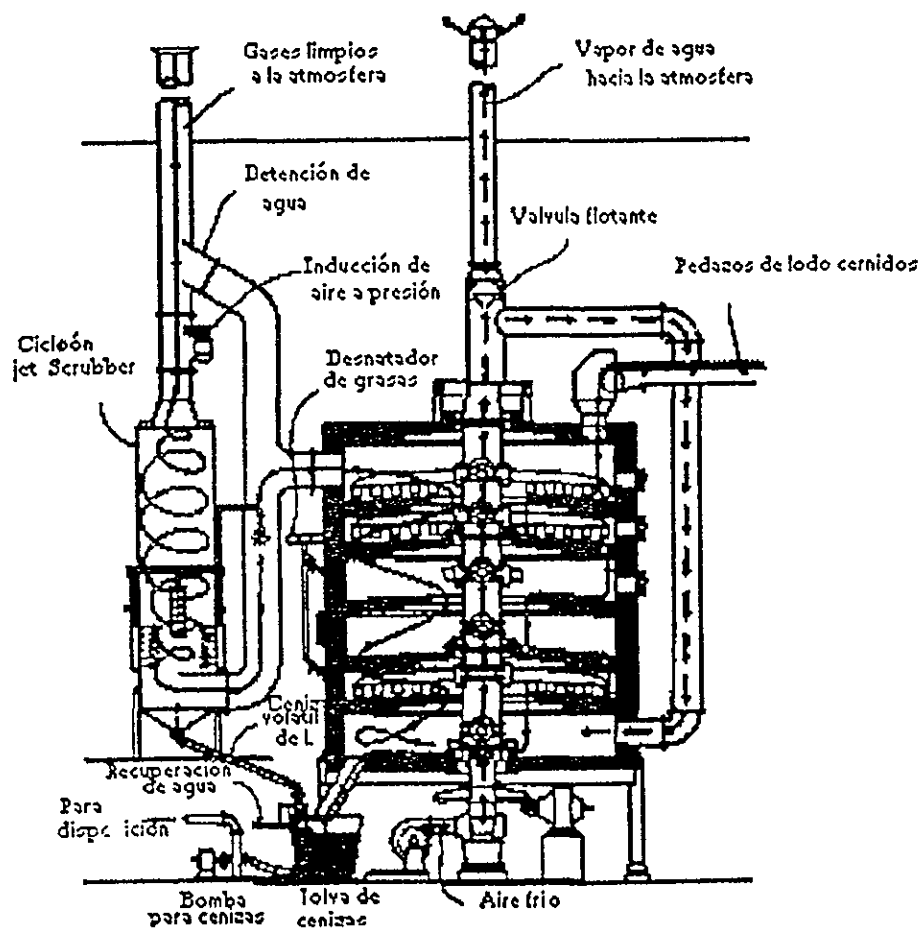
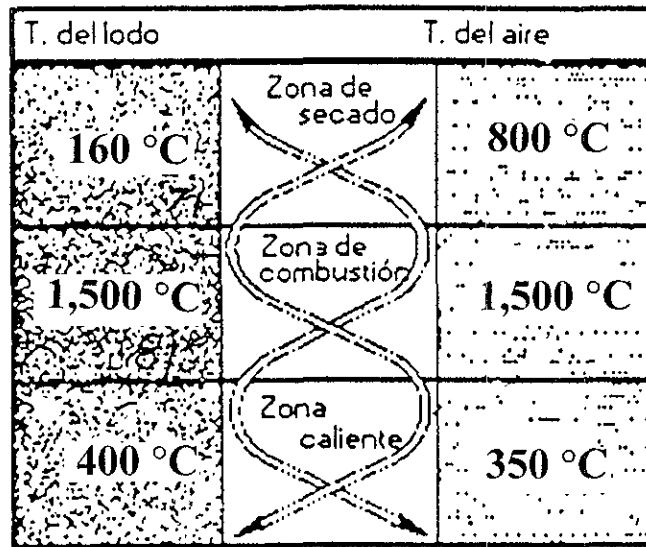


FIGURA 4.6. DIAGRAMA DE UNA PLANTA DE INCINERACIÓN DE CÁMARAS MÚLTIPLES.



En los hornos de cámaras múltiples se pasa el lodo en sentido descendente con ayuda de brazos giratorios. El lodo pasa de las zonas de secado hacia las de incineración. De hecho, son los gases de la incineración formados en la parte media los que sirven para secar los lodos en la parte superior. El aire requerido entra por la parte inferior, lo que ayuda a enfriar las cenizas de la parte baja. La FIGURA 4.7. muestra el principio del procedimiento.

FIGURA 4.7. ZONAS DEL PROCESO EN UN INCINERADOR DE CÁMARAS MÚLTIPLES.



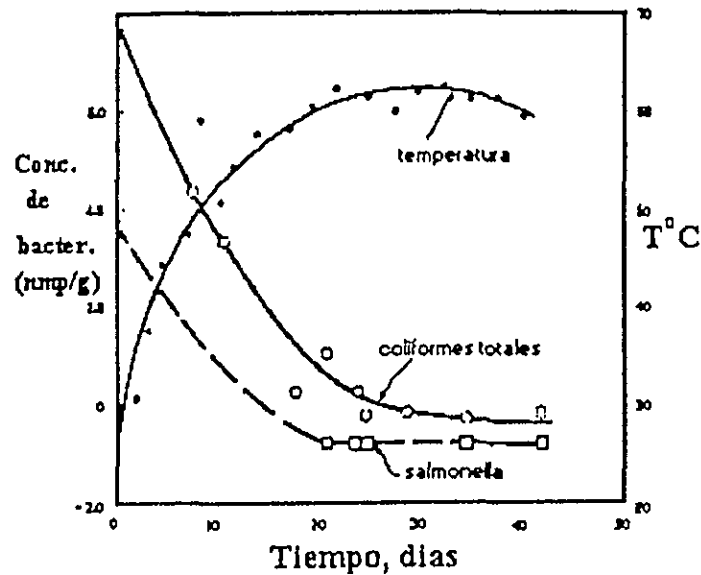
El sistema de lecho fluidizado emplea una temperatura de 800°C e inyecta una gran cantidad de aire por la parte baja para mantener a la arena en fluidificación. A través de este lecho se arrojan los lodos para ser oxidados. Este método debe ser sujeto de un estricto control de emisiones contaminantes al ambiente.

4.4.5. Composteo.

El composteo es un proceso de descomposición aerobia en el cual los lodos en un estado sólido o semisólido se oxidan al añadir oxígeno del aire por agitación mecánica o inyección de aire. Es un proceso exotérmico donde la liberación de energía tiene como resultado la destrucción de los organismos patógenos.

La FIGURA 4.8. muestra la destrucción de patógenos en el composteo no mecánico. Puede observarse que se alcanza una temperatura de 60°C, la cual que produce una desinfección sustancial más no la pasteurización, por lo que en la composta se encuentran con frecuencia patógenos que forman huevos.

FIGURA 4.8. VARIACIÓN DE LA DESTRUCCIÓN DE PATÓGENOS EN UNA OPERACIÓN DE COMPOSTEO POR APILAMIENTO NMP (NÚMERO MÁS PROBABLE) Burge, 1977.



Existen dos variantes del proceso. Una de ellas se realiza en un tanque cerrado rotatorio y la otra en un lecho donde se pone un soporte para crear una porosidad suficiente para permitir el paso del aire y su correcta distribución en los lodos. Las FIGURAS 4.9. y 4.10. muestran estos procesos.

FIGURA 4.9. PLANTA TÍPICA DE COMPOSTEO CERRADO.

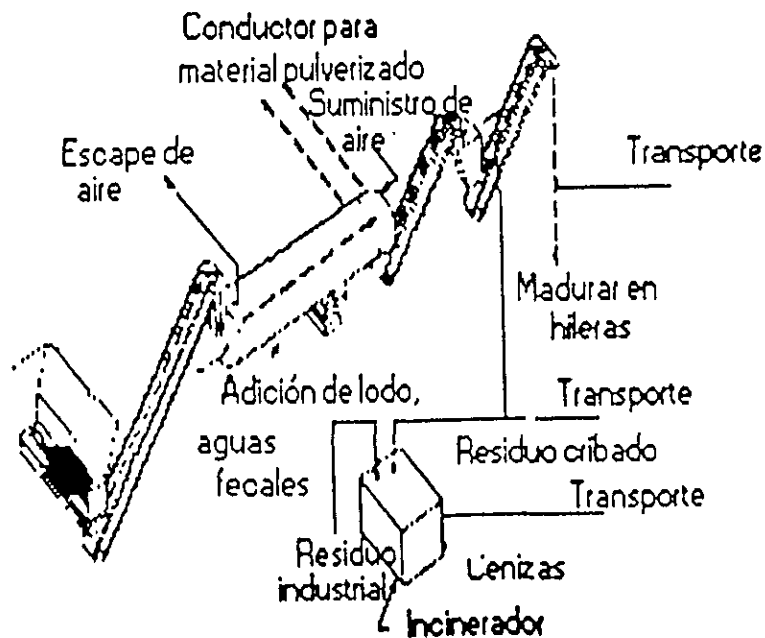
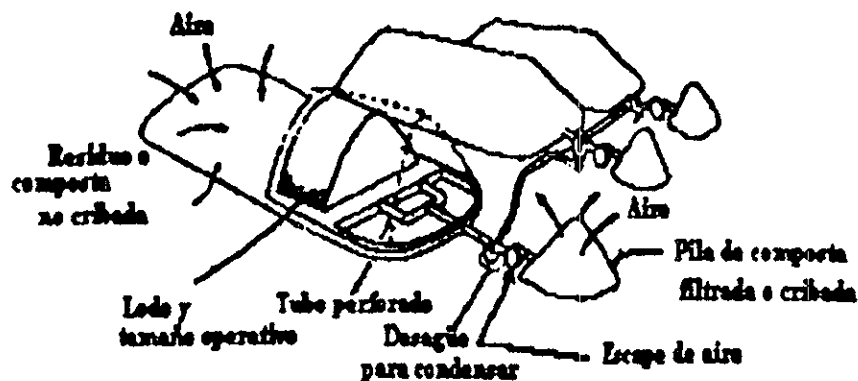


FIGURA 10. AIREACIÓN ESTÁTICA EN COMPOSTEO POR APILAMIENTO.



La composta formada puede ser empleada con fines de mejoramiento de suelo. Como una relación C/N óptima se tiene 20/1.

La principal variable de operación es el contenido de humedad, ya que si ésta es menor a 40% inhibe el proceso biológico y si es mayor a 60% crea zonas anaerobias.

Otras variables como el pH no es necesario controlarlas, ya que el proceso se autorregula con facilidad.

4.4.6. Estabilización con Cal.

La estabilización química de los lodos es una alternativa de los procesos biológicos. El cloro y la cal son los principales reactivos estudiados, siendo el primero poco empleado en la práctica. En cambio, la cal es el álcali más barato y usado en el tratamiento del agua residual. La estabilización con cal tiene por objeto eliminar patógenos, reducir olores y mejorar la drenabilidad, aun cuando durante el proceso incrementa el contenido de sólidos totales. Tradicionalmente la cal ha sido empleada para tratar lodos en instalaciones privadas, acondicionar el lodo antes de su deshidratación, incrementar el pH en digestores con problemas y remover el fósforo del agua en el tratamiento terciario.

El principio es muy sencillo: el incremento del pH ocasiona la destrucción de los patógenos y además la modificación de las características físicas y químicas de los lodos. La química del proceso ha sido poco estudiada y por tanto es poco comprendida.

El control del olor se produce como resultado de la inhibición de los procesos biológicos que generan subproductos de este tipo. De hecho, la elevación del pH provoca la desorción de algunos gases (a pH > 10.5 se libera amoníaco), que pueden provocar olor. Este proceso será descrito con mayor detalle en el capítulo 5.

4.4.7. Desinfección por Radiación.

Los efectos bactericidas de la luz solar intensa o luz artificial son debidos principalmente a la radiación ultravioleta o radiaciones de longitud de onda corta. La acción destructiva máxima ocurre más allá del espectro visible.

La luz ultravioleta puede destruir una célula, retrasar su crecimiento o cambiar su herencia por medio de la mutación genética.

La radiación gamma es una radiación electromagnética de longitud de onda muy corta. Se produce por cambios dentro de la estructura atómica, siendo uno de los productos de la descomposición radioactiva. Otros productos primarios de descomposición son las partículas beta que son electrones y las partículas alfa que son núcleos de átomos de helio que contienen dos protones y dos neutrones. La radiación alfa no tiene un poder penetrante significativo, y por lo tanto es ineficaz para llevar a cabo la desinfección. Por el contrario, la radiación gamma es muy efectiva por su poder penetrante y capacidad para destruir la materia celular.

4.5. TECNOLOGÍAS PARA EL DESECADO.

La tecnología empleada para el secado se basa en cualquiera de estos principios básicos:

- a) Los sólidos con mayor o menor densidad que el agua en que están contenidos.
- b) Los sólidos son de mayor tamaño que las moléculas del líquido.
- c) Los sólidos no se volatilizan a la temperatura de evaporación del agua.

La **TABLA 4.9.** enlista las posibles técnicas para secado de lodos.

4.5.1. Lagunas.

Las lagunas son simplemente excavaciones, con la debida protección para evitar infiltraciones al subsuelo, que periódicamente son llenadas con lodos. Una vez que se compactan se elimina el sobrenadante y el volumen se vuelve a llenar. Este proceso se repite hasta el llenado completo, el cual es cubierto o drenado según sea la disponibilidad de terreno.

Por lo regular, la profundidad de las lagunas varían entre 0.7 y 1.4 m. Cuando el lodo es aplicado se inicia un proceso de decantación que separa el exceso de agua contenido en el lodo, el cual se retorna a la planta para su tratamiento; por otra parte, el lodo acumulado en la laguna de secado comienza el proceso de evaporación del agua que se encuentra entre las partículas sólidas.

El tiempo de secado del lodo depende de las condiciones climáticas y de la profundidad de aplicación del lodo. Generalmente son requeridos de 3 a 6 meses para alcanzar una concentración de sólidos en el lodo entre el 20 y el 40. El lodo deshidratado se remueve por medio mecánicos.

Se recomienda la aplicación de las lagunas de secado en áreas que presenten altos grados de evaporación, ya que las precipitaciones pluviales y las bajas temperaturas inhiben la deshidratación de los lodos.

Para el diseño de las lagunas de secado se recomienda considerar un capacidad de carga de sólidos de 37 kg/m³*año. Cuando se desconoce el volumen de lodos por deshidratar, se recomienda en el diseño de la laguna de secado una superficie de 0.3 a 0.4 m²/hab cuando se trate de lodos primarios o secundarios.

El diseño adecuado de una laguna de secado requiere la consideración de factores como: el clima, la permeabilidad del subsuelo, características físico-químicas del lodo y profundidad de la laguna.

TABLA 4.9. TÉCNICAS PARA LA SEPARACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO DE LODOS.

OPERACIÓN UNITARIA	EQUIPO	PRINCIPIO DE SEPARACIÓN
Espesador	Tanque espesador	a
	Tubo espesador	a
	Laguna	a
Flotación	Flotación natural	a
	Flotación con aire disuelto	a
Centrifugación	Canasta	a
	Disco	a
	Tazón	a
	Tazón perforado	a y b
	Hidrociclón	a
Filtración	Filtro de vacío	b
	Filtro de prensa	b
	Filtro de banda	b
	Filtro de gravedad	b
Acondicionamiento con calor	Secador rotatorio	c
	Secador de luz intermitente	c
	Secador de arena	b y c

Los principios de separación se refieren a los incisos del punto 4.5. Vesilind *et al.*, 1985.

4.5.2. Espesador.

El espesamiento es la primera operación que se utiliza para eliminar parte del agua del lodo con el fin de reducir su volumen. En ambos procesos la principal característica involucrada del lodo es su sedimentación, la cual es medida en dos formas:

- Determinando la curva respectiva.
- Calculando el índice volumétrico de lodos (IVL) que es el volumen que ocupa un gramo de lodo después de 30 minutos de decantación.

El procedimiento de diseño se basa en el cálculo de la superficie requerida para depositar una cantidad dada de lodos en una determinada área y durante un cierto periodo. A esto se llama calcular el "flujo de sólidos" que se expresa en kg de sólido/m²*h. Para ello, se requiere calcular el flujo crítico de sólidos que es el flujo que limita la operación de un espesador. Esto se hace al sedimentar en una probeta de un litro diferentes concentraciones de sólidos, anotar la altura de la interfase sólido-líquido para diversos tiempos y trazar gráficas como la de la FIGURA 4.11., o a través de la fórmula:

$$GB = v \cdot C$$

donde:

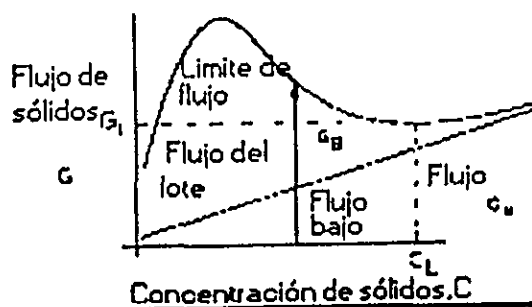
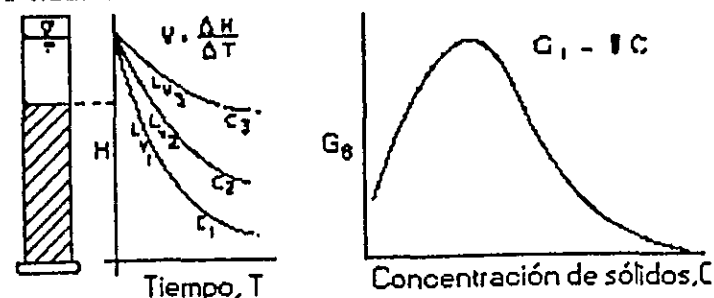
GB = flujo crítico de sólidos en un sistema por lote (kg/m²*h)

v = velocidad de sedimentación (m/h)

C = concentración de sólidos (kg/m³)

La velocidad de la interfase sólido-líquido es medida para diversas concentraciones de sólidos en una primera etapa. Mediante la multiplicación de la velocidad por la concentración correspondiente se obtiene el flujo y se gráfica contra la concentración. El flujo mínimo se obtiene al localizar el flujo en batch y al determinar el punto mínimo en la gráfica.

FIGURA 4.11. VELOCIDAD DE INTERFASE SÓLIDO-LÍQUIDO.



La FIGURA 4.12. muestra un esquema de un espesador. Los lodos entran por el centro y se distribuyen radialmente hacia la periferia saliendo por medio de vertedores. Las rastras ayudan a que los sólidos no se compacten y su extracción por bombeo sea adecuada, aunque también se considera que cualquier tipo de mezclado es perjudicial para el proceso. El uso de sedimentadores de placas es muy efectivo, ya que ayuda a la separación líquido-sólido y a la evacuación del agua (Stanley, 1974).

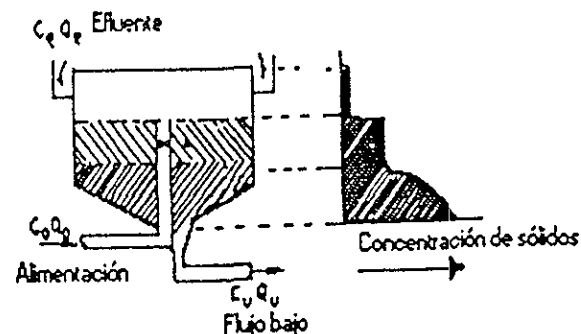
En un sedimentador de flujo continuo, el flujo total se compone tanto de sólidos que sedimentan por unidad de área, como de sólidos en movimiento con dirección descendente (por la purga) y ascendente (como producto de la remoción del sobrenadante). Así, en un espesador en operación por lote donde los sólidos no sedimentan por tener la misma densidad del líquido, el flujo de sólidos es cero ($v = 0$, por lo tanto $GB = 0$ para cualquier concentración de C). En un espesador continuo hay flujo de sólidos por el fondo debido a la extracción continua de lodos (purga). A este flujo se le denomina flujo de fondo y se define como:

$$G_u = (Q_u/A)*C$$

donde:

- G_u = flujo de purga (kg/m²h).
- Q_u = gasto de purga (m³/h).
- A = área del espesador (m²).
- C = concentración de sólidos (kg/m³).

FIGURA 4.12. SECCIÓN TRANSVERSAL DE UN TANQUE DE SEDIMENTACIÓN POR GRAVEDAD. LA GRÁFICA MUESTRA LA CONCENTRACIÓN TÍPICA DE SÓLIDOS EN UN SEDIMENTADOR CONTÍNUO.



El flujo de purga está señalado en la gráfica del flujo vs concentración en la FIGURA 4.11., y es una línea recta para un gasto de purga y área de espesador determinado.

El flujo total es:

$$G = GB + G_u$$

que puede ser graficado como se mostró en la **FIGURA 4.11**. Si la concentración de sólidos en el influente es C_0 y la concentración de purga descada es C_u , la curva total de flujo presenta un mínimo que corresponde al flujo crítico y que determina el área mínima requerida del espesador.

$$GL = (Q C_0) / A_{\min}$$

donde:

A_{\min} = área mínima requerida para espesar adecuadamente.

Si la carga de sólidos es muy alta, el espesador no puede manejar tal cantidad de lodos y el exceso de sólidos saldrá por el sobrenadante.

Los ensayos en probetas proporcionan una idea de que tanto es posible compactar los lodos, y por tanto cual es la concentración en la purga. Esto se obtiene al permitir que los lodos se concentren hasta un volumen final y se calcula la relación de alturas, de manera que:

$$C_f = C_0 (H_0 / H_f)$$

donde:

C_0 = concentración inicial de sólidos.

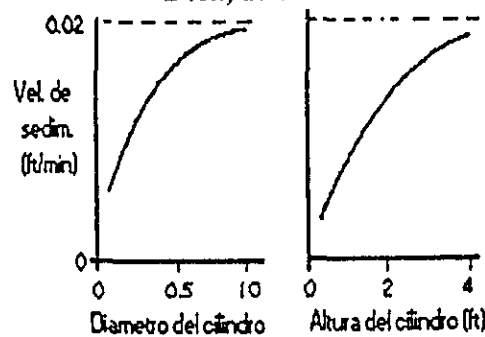
H_0 = altura inicial de la mezcla de sólidos y agua.

H_f = altura de los lodos compactados.

Es importante señalar que la información encontrada a nivel de laboratorio tiene limitaciones debido al efecto de escala, ya que las columnas de longitud menor a 90 cm producen velocidades de sedimentación menores cuando tienen menos de 30 cm de diámetro. Se ha observado que el efecto puede ser positivo o negativo en función de la concentración de lodo (**FIGURA 4.13**).

FIGURA 4.13. EFECTO DE LA ALTURA INICIAL Y EL DIÁMETRO DEL CILINDRO EN LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN PARA UN LODO ACTIVADO TÍPICO DE 2 000 mg/L.

Dick, 1967.



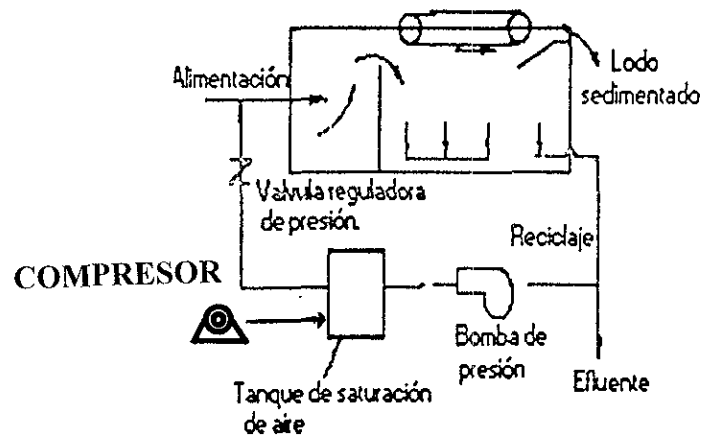
Los espesadores por gravedad son usados tanto en batch como en continuo. La experiencia demuestra que lo mejor es no mezclar los diferentes tipos de lodo. Con purgas de lodos activados se alcanzan concentraciones de 1.5 a 4 % mientras que con primarios se alcanzan hasta de 8%.

4.5.3. Espesamiento Por Flotación.

En ocasiones los lodos son muy ligeros, por lo que la sedimentación y la compactación es deficiente. Por ejemplo, los lodos de purga de lodos activados tienen densidad de 1.08 y su separación por flotación es más fácil que por sedimentación. De hecho, este proceso se emplea con frecuencia para flóculos biológicos. Su empleo para lodos primarios no es factible.

La FIGURA 4.14. muestra el proceso, y se observa que la unidad de flotación requiere que el aire se disuelva a presión en una unidad aparente, y luego sea mezclado con el lodo. Cuando la mezcla es a presión atmosférica, las burbujas se desprenden y se adhieren a los sólidos incrementando su flotabilidad y arrastrándolos hacia arriba. La mayor parte de las veces el espesamiento por flotación se acompaña de reactivos como polielectrolitos. Estos polímeros tienden a aglomerar las partículas y crear flóculos discretos lo que ayuda al proceso, ya que las partículas muy pequeñas aun cuando son ligeras requieren mucho tiempo para alcanzar la superficie. Con este procedimiento los lodos de lodos activados pueden ser concentrados hasta un 6%.

FIGURA 4.14. DISOLUCIÓN DEL AIRE EN UN TANQUE DE FLOTACIÓN.



La aplicabilidad de la flotación se determina con la ayuda del equipo mostrado en la FIGURA 4.15. A medida que el aire comprimido en agua se libera, en los lodos se forman pequeñas burbujas. La tasa con la cual se forma la interfase sólido-líquido determina los requerimientos de aire empleando un procedimiento similar al de la determinación de la velocidad de sedimentación y el área requerida. Las variables adicionales que se registran son la cantidad de aire y la presión. El efecto del aire es descrito por la relación en peso aire/sólido y representado en la FIGURA 4.16. Se puede observar que conforme se incrementa la relación aire/sólido, la recuperación y el espesamiento de los sólidos alcanzan un valor máximo, por lo que el empleo de grandes cantidades de aire no tiene sentido. El punto óptimo debe ser determinado en el laboratorio.

FIGURA 4.15. APARATO PARA PRUEBAS DE FLOTACIÓN.

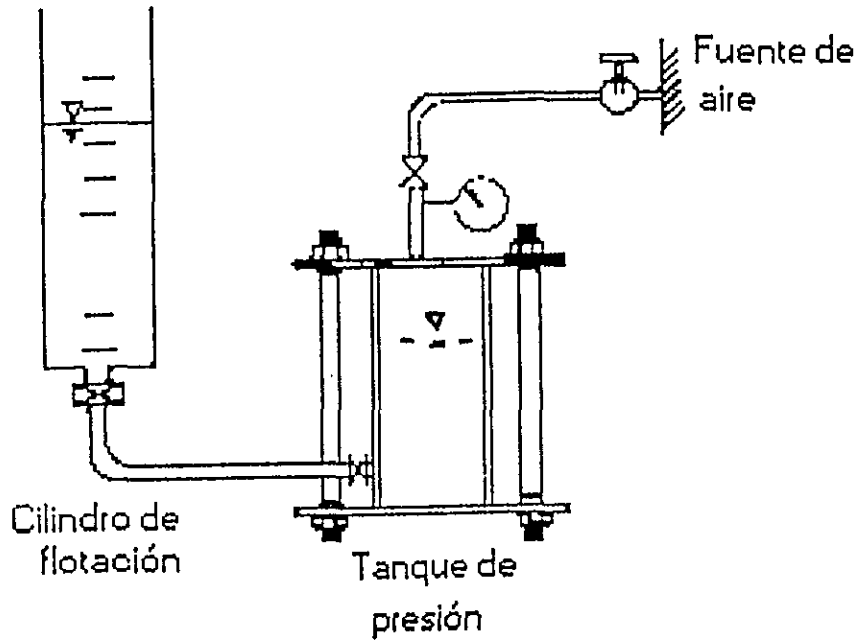
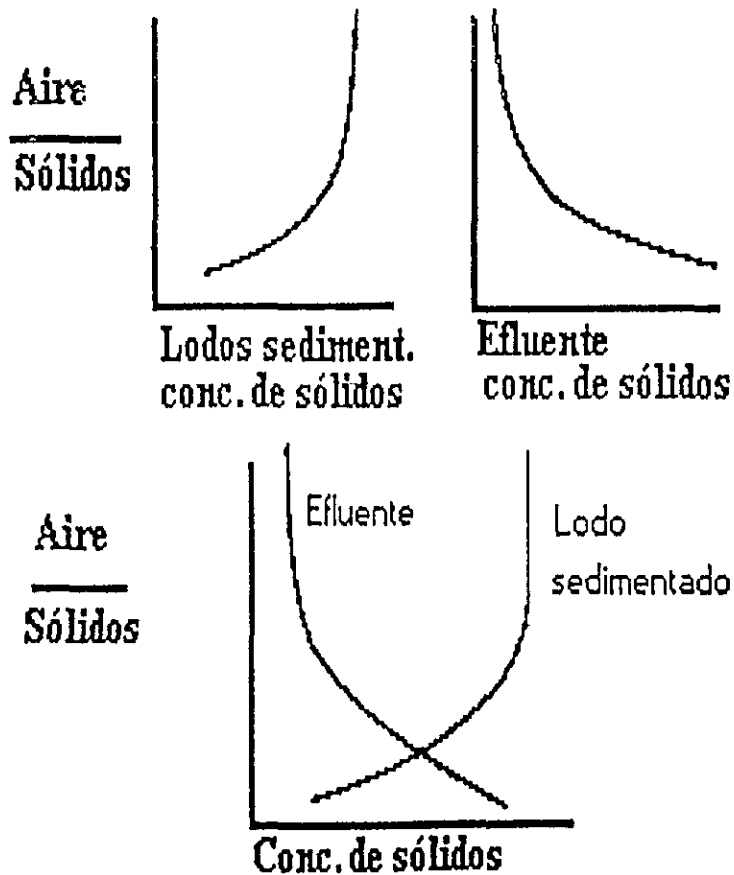


FIGURA 4.16. EFECTO DE LA RELACIÓN AIRE/SÓLIDO EN LOS SÓLIDOS SEDIMENTADOS Y EN LA RECUPERACIÓN DE SÓLIDOS DISUELTOS EN EL AIRE EN UN SISTEMA DE FLOTACIÓN.



En la TABLA 4.10. se presentan los datos comparativos entre los procesos de flotación y centrifugación.

TABLA 4.10. COMPARACIÓN DE LAS OPERACIONES DE ESPESAMIENTO, FLOTACIÓN Y CENTRIFUGACIÓN.

PROCESO	CONCENTRACIÓN OBTENIDA	COMENTARIOS
• Espesador	7%	Utilizados para lodos biológicos y para lodos procedentes de tratamientos químicos.
• Flotación	6%	Utilizados para lodos ligeros (lodos biológicos). Emplea polímeros.
• Centrifugación	30% lodos primarios 10% lodos activados	Utilizados para lodos espesados y muy resistentes (lodos activados acondicionados con alúmina o lodos químicos)

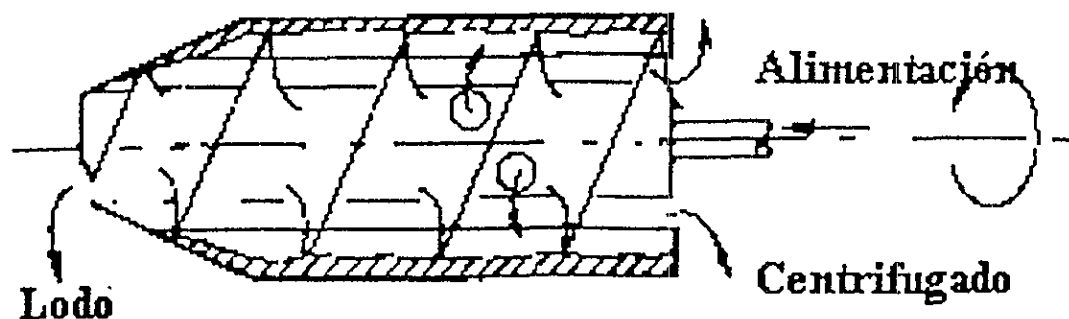
4.5.4. Centrifugación.

La separación se realiza por diferencia de densidad y el objetivo es producir una pasta de lodos seca y descargar un centrifugado claro. En este proceso se multiplica la constante "g" por un valor de 1 000 por lo que su eficiencia de separación alta.

En la centrifugación se ha mostrado que la compactación del lodo, cuando se le ejerce una fuerza centrífuga es independiente de su concentración inicial. El drenado por centrifugación requiere que no sólo los lodos decanten sino que además sean lo suficientemente resistentes para ser removidos de la centrifugadora con una bomba de tornillo. Dicha firmeza es evaluada empleando un penetrómetro estándar que consiste de una varilla plástica que se deja caer en un lodo compactado. La profundidad a la cual no penetra la varilla da la medida de que tan fácil pueden ser eliminados los sólidos de una centrifuga.

La FIGURA 4.17. muestra el equipo más común denominado de tazón o tipo decantador. Consiste de un recipiente que gira alrededor de un eje horizontal. En el cuerpo del dispositivo hay orificios que permiten salir al centrifugado hacia un extremo, mientras que hacia el otro, más estrecho, se remueven los sólidos. A medida que los sólidos se depositan en las paredes, un tornillo interior que gira a una velocidad ligeramente inferior, son transportados de la parte ancha a la estrecha. La alimentación se hace por aspersión de un tubo central y este es el punto crítico de operación. El tiempo de retención centrífuga es de 20 s.

FIGURA 4.17. CENTRIFUGACIÓN PARA SÓLIDOS.



La centrifugación se emplea para deshidratar lodos acondicionados con sulfato de aluminio o lodos químicos y también los biológicos.

El diseño de las centrifugas se basa en la determinación del área y del tiempo de retención. El método se desarrolló en 1952 por Sigma y se basa en el escalamiento geométrico de centrifugas en operación. Se supone que las partículas sedimentan en el régimen laminar, no chocan con sus vecinas y se aceleran directamente por la velocidad rotacional, de forma que el flujo es proporcional al rendimiento. Para dos máquinas de configuración similar se tiene:

$$Q_1/Q_2 = \Sigma_1/\Sigma_2$$

con:

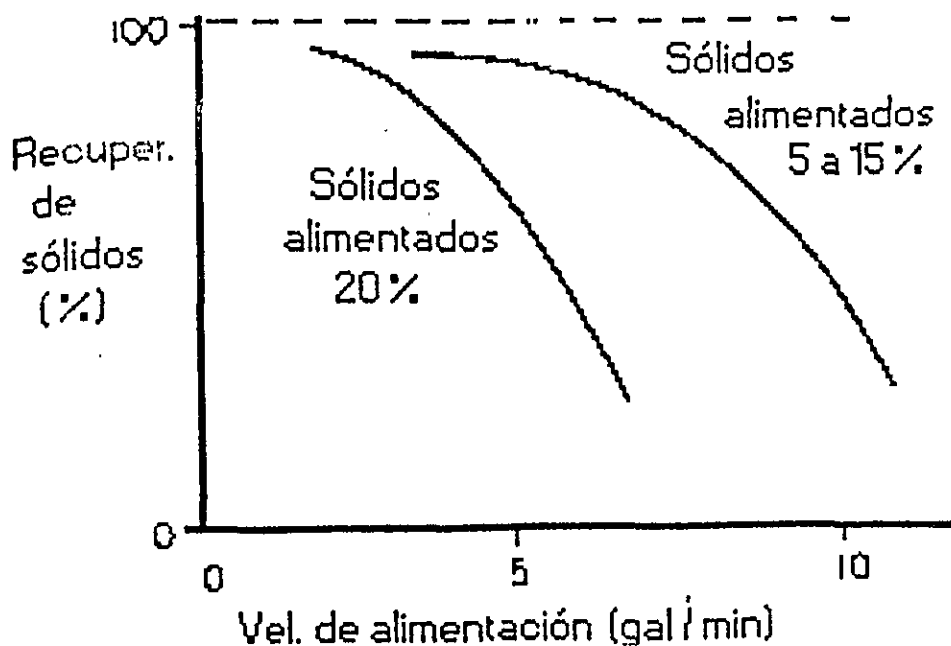
$$\Sigma = (V w^2)/g * \ln(r_2/r_1)$$

donde:

- V = volumen hidráulico de la tasa centrifuga.
- w = velocidad rotacional en radianes por segundo.
- g = aceleración debida a la gravedad.
- r₁, r₂ = son los radios de la centrifuga al nivel de lodos y de la pared.

Otro parámetro por considerar es la carga másica, ya que para una centrifuga la introducción de lodos no debe exceder la tasa de extracción (FIGURA 4.18.).

FIGURA 4.18. RECUPERACIÓN DE SÓLIDOS DE UNA SUSPENSIÓN DILUIDA Y CONCENTRADA DE CARBONATO DE CALCIO.



Cuando no se dispone de información de centrifugas similares, es necesario estimar su tamaño por medio de ensayos de laboratorio. Lo más común es emplear una centrifuga y analizar la claridad del centrifugado y la consistencia de la pasta con una varilla de vidrio. Características que sirven para definir la eficiencia de separación y el comportamiento de los lodos durante su arrastre con tornillo. Un lodo que sedimente bien, pero que produzca una pasta de lodos sin consistencia, no es tratable por centrifugación.

La sedimentación en un tubo de ensayo puede ser determinada usando una sonda con luz sincronizada con el giro de los tubos como se muestra en la **FIGURA 4.19**. Si se cuenta con un orificio en el lugar adecuado se puede ir midiendo el espesor del lodo en función del tiempo. En este caso, el coeficiente de sedimentabilidad se define como:

$$S = V / w^2 \gamma$$

donde:

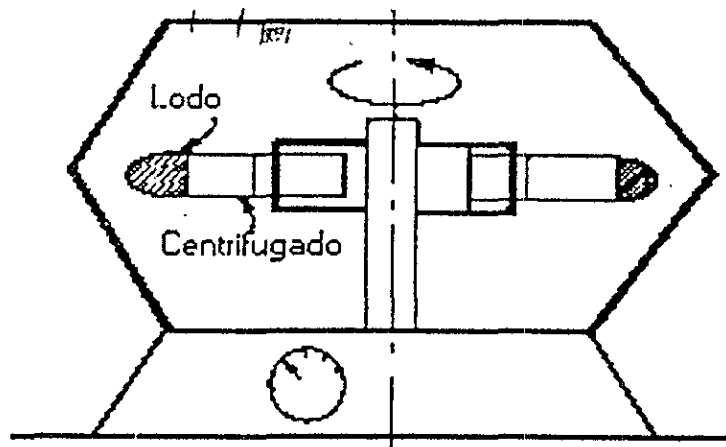
V = velocidad de la interfase.

r = distancia a la línea central de la centrifuga.

w = velocidad en rad/s.

El valor de S al parecer es independiente de la fuerza aplicada y por lo tanto una medida de que tan bien sedimentan los sólidos.

FIGURA 4.19. PRUEBA DE CENTRIFUGACIÓN EN TUBO DE ENSAYE.



La evaluación de una centrifugación en el laboratorio tiene limitaciones para representar los modelos a gran escala, en especial para determinar el comportamiento en flujo continuo. Por tanto, es de importancia medir la firmeza o cuerpo del lodo, y ésta se realiza con el penetrómetro de la **FIGURA 4.20**. Una varilla de metal o de plástico se deja caer en los lodos comprimidos y se mide el grado de penetración. Un lodo que es fácilmente eliminado con un tornillo no es fácilmente penetrado por la varilla. Los lodos ligeros, como los que contienen metales hidróxidos, son muy suaves, no oponen resistencia y se retiran difícilmente de la centrifuga.

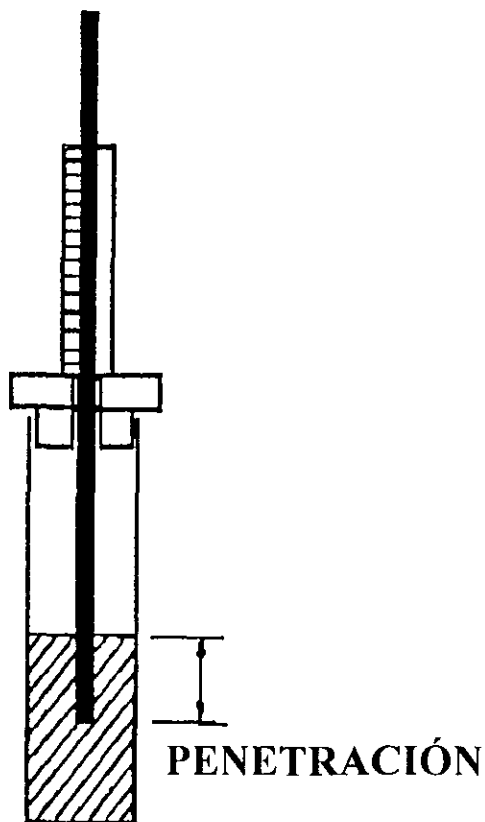
Las variables para el diseño y operación de una centrífuga se muestran en la TABLA 4.11.

TABLA 4.11. *VARIABLES DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE UNA CENTRÍFUGA DE TAZÓN.*

VARIABLES DEL EQUIPO	VARIABLES DEL PROCESO
Longitud del área de drenado	Tasa de alimentación
Angulo del cabezal	Características de alimentación
Velocidad de giro	• Concentración de sólidos
Velocidad del tornillo extractor de sólidos	• Acondicionamiento químico
Radio de la centrífuga	• Edad de lodos
Punto de adición del químico	

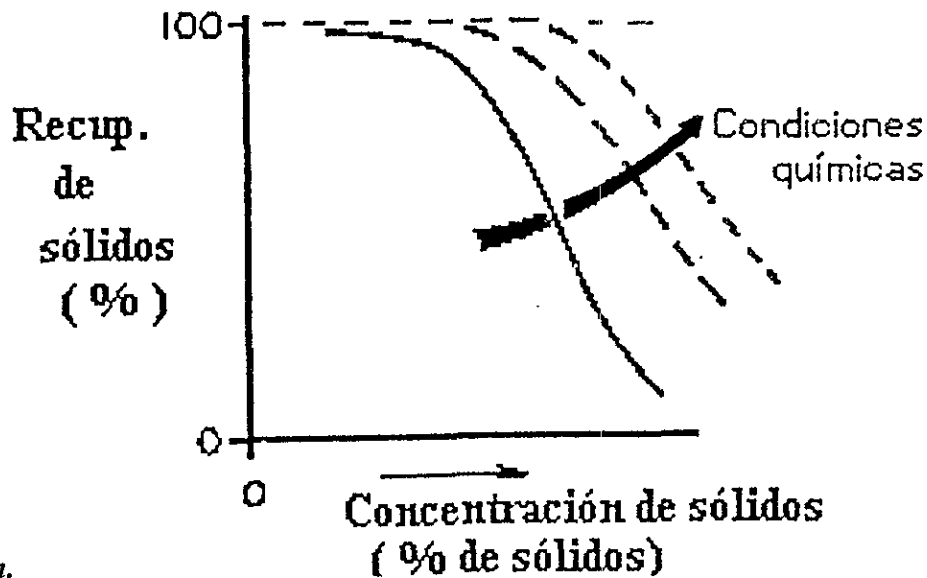
Vesilind, *et al.*, 1985.

FIGURA 4.20. *PENETRÓMETRO USADO PARA ESTIMAR LA CONSISTENCIA DE UN LODO.*



El obtener tanto una pasta de lodos compacta como un centrifugado claro, son objetivos cuyo cumplimiento simultáneo es difícil. Al graficar la recuperación de sólidos vs la concentración de sólidos de la torta, se obtiene la gráfica de la FIGURA 4.21. Así, al incrementar la profundidad del área del drenado, decrece el área de secado e incrementa el tiempo de residencia hidráulica, por lo que hay mayor remoción de sólidos. Esto es, una mayor fracción de sólidos sedimentan pero la compactación de la torta es menor. Sólo cambiando las características del lodo pueden incrementarse la tasa de recuperación y contenido de sólidos en la pasta (cambio de dirección de la FIGURA 4.21.). La forma más frecuente para hacerlo es empleando polielectrolitos y la menos común, pero que también se hace, es modificando las condiciones de operación de la etapa previa a la deshidratación; por ejemplo, los lodos primarios drenan bien en una centrífuga si se evita que caigan en condiciones sépticas.

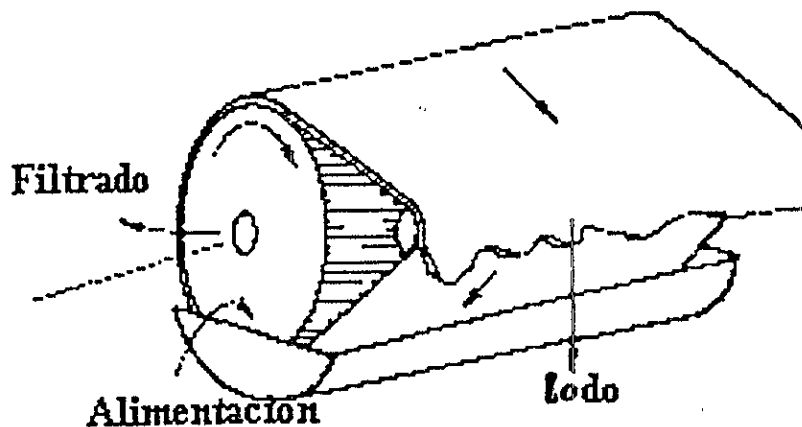
FIGURA 4.21. RECUPERACIÓN DE SÓLIDOS vs CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS.



4.5.5. Filtración.

La filtración que se aplica en los lodos es de tipo superficial y se hace tanto a vacío como a presión. La forma más común es el tipo tambor rotatorio (FIGURA 4.22.). Los más modernos recogen los lodos deshidratados sobre una tela metálica colocada en un tambor con orificios y descargan los lodos en una banda.

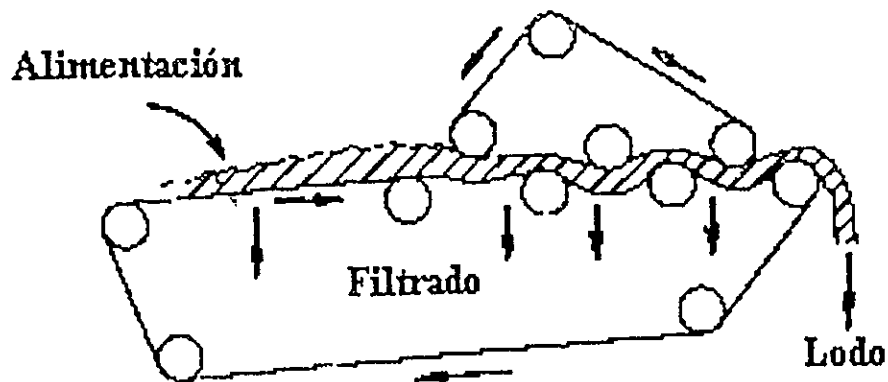
FIGURA 4.22. FILTRO ROTATORIO DE VACÍO.



Los filtros de vacío no operan eficientemente con lodos ligeros como los de los lodos activados o los que tienen algunos metales en forma de hidróxido, incluso después de acondicionamiento. La tela del filtro se tapa fácilmente, por lo que en ocasiones se emplea una técnica de revestimiento previo (prefiltro) que encarece la operación.

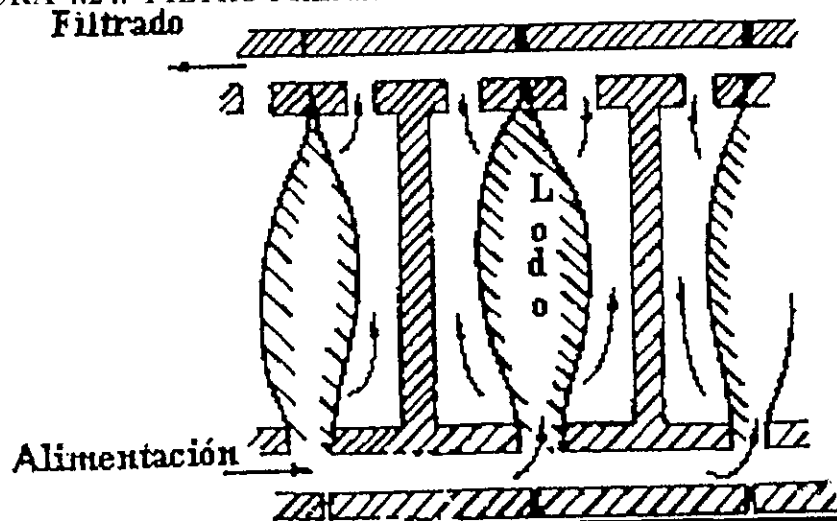
El filtro banda desarrollado primeramente en Europa, es más eficiente para esta aplicación que el filtro de tambor. Los lodos acondicionados se dejan caer en una banda perforada donde el escurrimiento es por gravedad (FIGURA 4.23.). El lodo ya compactado es después presionado por una serie de rodillos hasta producir una torta seca. Un problema frecuente es que los lodos desbordan por las orillas de las bandas al ser aplastados.

FIGURA 4.23. FILTRO BANDA.



En el filtro prensa (FIGURA 4.24.), el lodo acondicionado químicamente se bombea a cavidades formadas por una serie de platos cubiertos por una tela de filtro. El líquido atraviesa el filtro y retiene los sólidos, formando una pasta en las cavidades. Posteriormente, los platos son abiertos y el lodo removido en forma manual por el operador. Este proceso es de gran eficiencia para cualquier tipo de lodo.

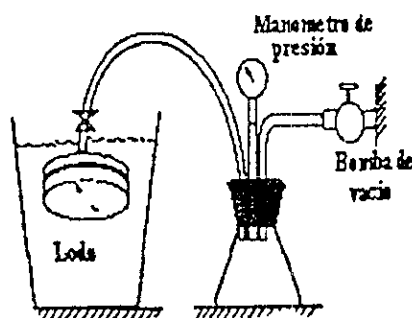
FIGURA 4.24. FILTRO PRENSA CON PLACAS Y BASTIDORES.



Los filtros se diseñan en función del rendimiento de filtración que se define como la cantidad de sólidos secos producidos por unidad de tiempo y de superficie de filtro. Los filtros que se emplean para deshidratar lodos municipales tienen rendimientos de 9.8 a 19.5 kg de sólidos secos/m² de superficie*h.

La filtración en un filtro rotatorio de vacío implica tres etapas: carga del filtro, deshidratación y descarga de la torta. Esto es modelado empleando un filtro de membrana (FIGURA 4.25.). Un disco acanalado o perforado cubierto por una tela que sirve de filtro se conecta a una fuente de vacío, se sumerge en el lodo por un tiempo y posteriormente se levanta, se para el vacío y se remueve la torta. La torta es secada y pesada para determinar el contenido de sólidos. Se calcula el rendimiento usando el peso de los sólidos por área del filtro y el tiempo del proceso.

FIGURA 4.25. PRUEBA DE FILTRACIÓN PARA FILTROS DE VACÍO.



Para los filtros banda y los filtros a presión no hay dispositivos experimentales comúnmente aceptados para su diseño. Aun así, en todos los casos, el concepto de la resistencia específica a la filtración (REF) es útil para describir la filtrabilidad de un lodo, debido a que al aumentar su valor implica que el lodo es más difícil de deshidratar.

El aparato de la FIGURA 4.26. se emplea para medir la REF. El lodo se coloca en un embudo tipo büchner sobre el cual se coloca un papel filtro. El büchner se encuentra sobre una probeta graduada en la cual se mide el volumen filtrado en función del tiempo. El volumen filtrado se grafica en un papel aritmético contra el tiempo dividido entre el volumen (FIGURA 4.27.) produciendo una recta de pendiente b. La REF se calcula mediante:

$$REF = (2P A^2 b)/(\mu w)$$

donde:

- P = presión de vacío empleada.
- A = área de filtración.
- b = pendiente de la curva experimental.
- μ = viscosidad.
- w = concentración de sólidos en la torta.

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

FIGURA 4.26. EMBUDO BÜCHNER PARA LA PRUEBA DE RESISTENCIA ESPECÍFICA A LA FILTRACIÓN.

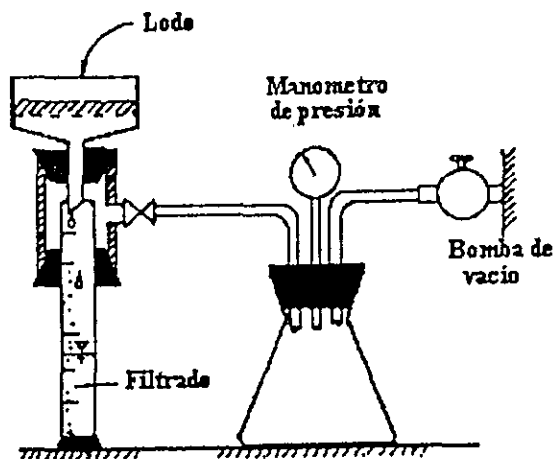
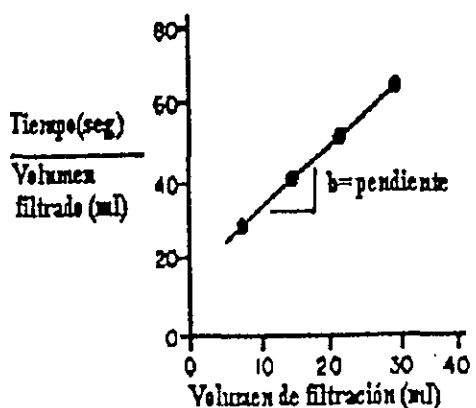
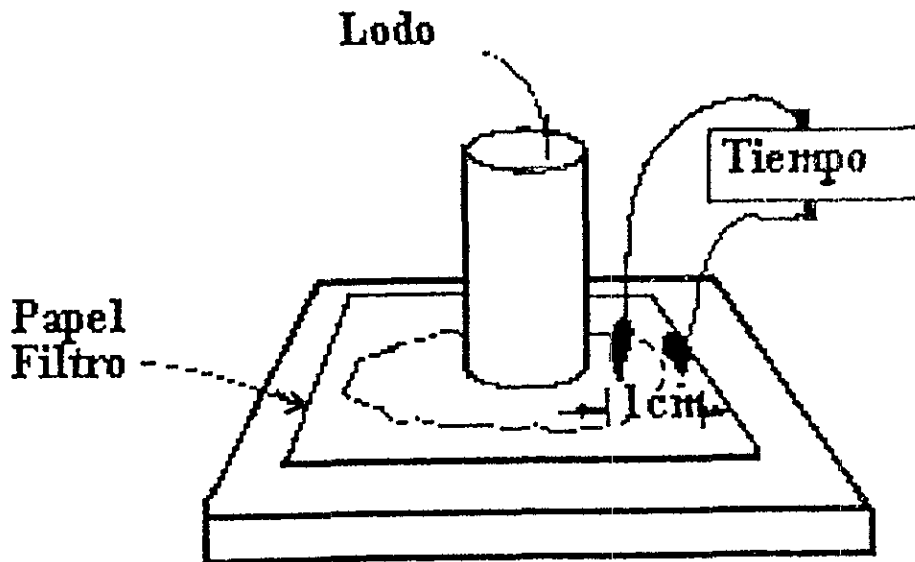


FIGURA 4.27. RESULTADOS OBTENIDOS DEL EMBUDO BÜCHNER PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA ESPECÍFICA A LA FILTRACIÓN.



Otro método para medir la filtrabilidad es el tiempo de succión capilar (TSC) que es el tiempo en que tarda el agua de los lodos en moverse un centímetro por difusión al ser colocados en un filtro (FIGURA 4.28.). Esta medición sirve para apreciar que tan fácil un lodo se libera del agua que contiene.

FIGURA 4.28. PRUEBA DE TIEMPO DE SUCCIÓN CAPILAR.



Todos los filtros requieren acondicionar químicamente el lodo, esto generalmente se hace con cal o cloruro férrico cuyo peso no debe ser considerado en el cálculo del rendimiento del proceso. Así, se logra con frecuencia concentraciones de lodos del 40% en los filtros, un 10% de esa cantidad lo constituye la cal.

4.5.6. Lechos de Secado.

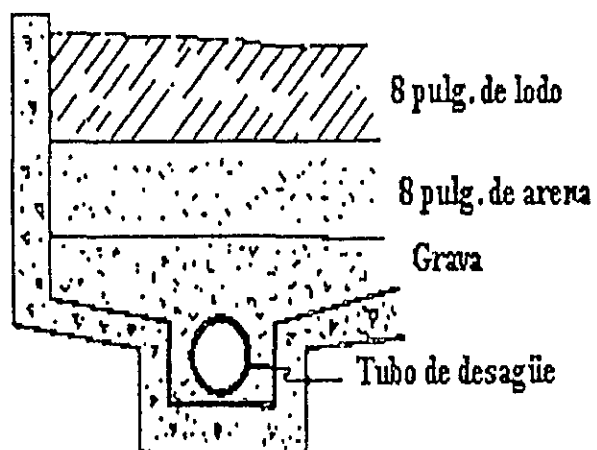
Los lechos de secado son el método más antiguo para la deshidratación de lodos. Esta tecnología continúa usándose en plantas de tratamiento de agua residual de tamaño pequeño y medio, para la deshidratación de los lodos producidos en el tren de tratamiento de agua residual.

Los lechos de secado con arena emplean en buena parte la energía solar para remover el agua. La FIGURA 4.29. muestra un esquema de la sección transversal de un lecho de secado.

El proceso consiste en colocar una capa de lodo con un espesor de 15 a 20 cm sobre la cama de arena y grava. En la primera etapa la eliminación del agua es por filtración y posteriormente actúa la evaporación. Cada sección de la cama de materiales graduados debe tener un sistema de drenes para eliminar el exceso de agua y rastras para remover los lodos deshidratados. El periodo de secado es de 10 a 15 días, y se obtienen concentraciones de sólidos del 60 al 70% (Syed, 1985).

En plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, con frecuencia la estabilización de los lodos se hace por digestión y deshidratación en lechos de secado de arena. A pesar de ello rara vez se mide que tan fácil pierde un lodo el agua que contiene por drenado o evaporación. Cabe señalar que la evaporación es el mecanismo principal de secado en los lechos de arena.

FIGURA 4.29. SECCIÓN TRANSVERSAL DE UNA CAMA DE ARENA PARA SECADO.



CAPÍTULO 5

ESTABILIZACIÓN CON CAL

5.1. FUNDAMENTOS.

La estabilización química de los lodos es una alternativa de los procesos biológicos. El cloro y la cal son los principales reactivos estudiados, siendo el primero poco empleado en la práctica; en cambio, la cal es el álcali más barato y usado en el tratamiento del agua residual. La estabilización con cal tiene por objeto eliminar patógenos, reducir olores y mejorar la drenabilidad, aun cuando durante el proceso se incrementa el contenido de sólidos. También es importante mencionar que este método no reduce el contenido de material orgánico (sólidos volátiles), por lo que el término estabilización es relativo. Tradicionalmente la cal ha sido empleada para tratar lodos en instalaciones privadas, acondicionar el lodo antes de su deshidratación, incrementar el pH en digestores con problemas y remover el fósforo en el tratamiento terciario.

La EPA clasifica a la estabilización con cal como el proceso de mejor remoción de patógenos si se mantiene un pH de 12 durante 2 horas.

Es frecuente disponer de los lodos tratados con cal en suelos agrícolas y emplearlos en viveros al menos una vez, previo mezclado con hojas y tamizado. La aplicación en cultivos no se recomienda en suelos que son alcalinos, como ocurre a veces en zonas áridas (EPA, 1996). Se recomienda la estabilización con cal para:

- Pequeñas plantas con disponibilidad de terreno para colocarlo.
- Plantas grandes con disponibilidad de terreno a bajo costo.
- Plantas pequeñas cuyo lodo debe ser almacenado antes de su transporte a otro lugar donde son tratados.
- Plantas de tratamiento con capacidad muy variable, para excesos de lodos.
- Plantas que tienen sin operar por algún motivo el proceso de incineración.
- Plantas donde se requiere eventualmente algún proceso de estabilización de lodos.

La estabilización con cal se efectúa previo a la deshidratación (preestabilización) o después de la deshidratación (post-estabilización) siendo esta última la más empleada por la reducción en el consumo de cal que genera. Además, la postestabilización tiene la ventaja de no influir en el equipo empleado para la deshidratación.

El procedimiento estándar para el tratamiento con cal consiste en añadir una dosis suficiente para elevar el pH a 12 durante dos horas antes de la deshidratación, procedimiento que se aplica en plantas pequeñas con cortas distancias de transporte. La adición de cal sola (sin sales de aluminio o fierro) puede producir lodos que no deshidraten adecuadamente. Por ello, la prestabilización con cal sin ayuda de acondicionamiento no es, en general, un proceso de costo eficiente.

Existen dos procedimientos empleados en plantas de gran tamaño con el fin de disminuir costos (**Water Environment Federation, 1993**). El primero consiste en emplear una elevada dosis de cal y añadir sales de fierro como acondicionador antes de aplicar filtración al vacío (prestabilización). En el segundo, se añade cal viva a lodos deshidratados (postestabilización).

La diferencia entre estos métodos radica en el volumen de cal que se añade a los lodos, ya que entre mayor sea el volumen de lodos mayor será la cantidad de cal utilizada en la estabilización de los mismos. Ambos procedimientos presentan los mismos resultados en la eliminación de malos olores y en la disminución del contenido de elementos patógenos; sin embargo, aunque los dos sistemas son simples y confiables, existen variaciones en el costo de inversión y operación, como resultado de la infraestructura y tecnología necesarias para el manejo de los volúmenes de lodos procedentes de uno u otro tren de tratamiento. Los lodos así estabilizados son reutilizables, bajo ciertas condiciones, en campos de cultivo donde aportan nitrógeno, cal y materia orgánica al suelo.

Como en cualquier proceso, también existen desventajas. Comparada con el cloro, la cal es menos efectiva para estabilizar materia orgánica, principalmente aquella que genera el crecimiento de organismos. Errores en la dosificación de cal (menor a la requerida) puede provocar que el pH decrezca durante el almacenamiento y se generen problemas de olor y crecimiento de patógenos.

En comparación con la digestión, la cantidad de lodos no es disminuida (en masa). De hecho, se incrementa tanto por la presencia de la cal como de los compuestos que precipita en forma proporcional a la cantidad de cal empleada, lo que implica un mayor costo de transporte y de disposición de acuerdo con el grado de deshidratación alcanzada, costos que deben ser considerados antes de seleccionar este proceso.

La cal, añadida junto con sales de fierro o de aluminio sirve como acondicionador para la deshidratación y control del olor. Su principal desventaja es que si la cal presenta un lixiviado y el pH disminuye, el olor de los lodos regresa ya que no actúa realmente como estabilizador de la materia orgánica. Una vez hecha la suspensión, tanto la cal viva como la apagada son químicamente iguales. La suspensión puede ser preparada tanto por lote como de manera continua.

5.2. PRINCIPIO Y CRITERIOS DE DISEÑO.

El principio es muy sencillo: el incremento del pH ocasiona la destrucción de los patógenos y además la modificación de las características físicas y químicas de los lodos. La química del proceso ha sido poco estudiada y por tanto es poco comprendida.

El control del olor se produce como resultado de la inhibición de los procesos biológicos que generan subproductos de este tipo. De hecho, la elevación del pH provoca la desorción de algunos gases (a pH > 10.5 se libera amoníaco).

Los criterios por definir son el pH, tiempo de contacto y dosis de cal. La cantidad de cal debe ser suficiente para suministrar una alcalinidad residual y mantener un pH elevado por varios días. En general, se recomienda tener un pH de 12 durante 2 horas, y se requiere elevar el pH por arriba de 12 en los lodos para lograrlo. No es necesario mantener los lodos las dos horas en el tanque de contacto siempre y cuando se monitoree el pH. El decaimiento del pH ocurre por la disolución del CO₂ de la atmósfera generando un ácido débil (H₂CO₃) que en forma lenta consume la alcalinidad. Llegado cierto punto, la actividad biológica se reinicia y en caso de ocurrir reacciones anaerobias, la producción de ácidos orgánicos disminuirá aun más el pH.

La dosis de cal depende de varios factores como son: el tipo de lodo (primario, secundario, etc.), la composición química (contenido orgánico) tanto en el lodo como en el líquido y la concentración de sólidos. Los lodos primarios tienden, en general, a deshidratarse en forma más fácil. La TABLA 5.1. muestra valores registrados en Lebanon, Ohio:

TABLA 5.1. CANTIDAD DE CAL REQUERIDA PARA MANTENER EL pH EN 12 POR 30 MIN.

TIPO DE LODO	CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS (%)		DOSIS DE CAL Ca(OH) ₂ /kg de sólido seco		pH PROMEDIO	
	INTERVALO	MEDIO	INTERVALO	MEDIO	INICIAL	FINAL
Lodo primario	3 a 6	4.3	0.06 - 0.17	0.12	6.7	12.7
Purga de lodos activados	1 a 1.5	1.3	0.21 a 0.43	0.30	7.1	12.6
Mezcla de lodos digeridos anaerobicamente	6 a 7	5.5	0.14 a 0.25	0.19	7.2	12.4
Lodos de fosas sépticas	1 a 4.5	2.7	0.09 a 0.51	0.20	7.3	12.7

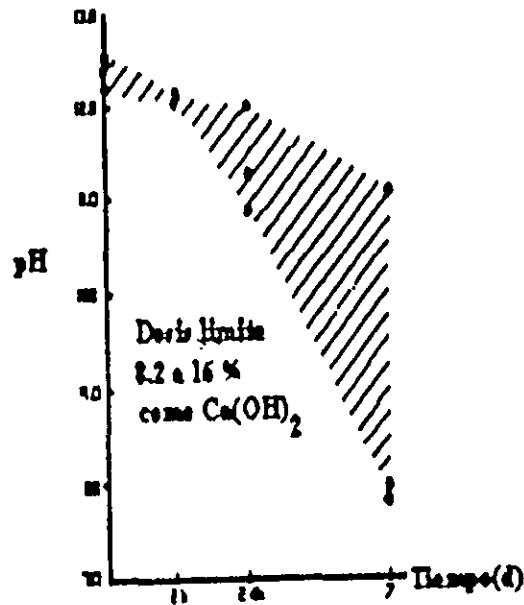
ADAPTADO POR: Water Environment Federation, 1993.

El factor que más influye en la cantidad de reactivo es la concentración de sólidos. Generalmente, a medida que la cantidad de sólidos se incrementa, la dosis requerida aumenta aunque, al igual que para el tratamiento del agua, la dosis requerida por unidad de volumen es mayor conforme los lodos están más diluidos. Sin embargo, la dosis por unidad de masa de lodos es un valor relativamente constante. Por ello la cantidad usada en plantas de tratamiento es del mismo orden (0.5 a 4.5% de la masa total de lodo para un pH de 12).

La determinación de la dosis exacta debe ser efectuada en laboratorio, teniendo presente que la cantidad requerida para mantener el pH a 12 por dos horas es alrededor de 1.5 veces la necesaria para obtener ese valor puntual.

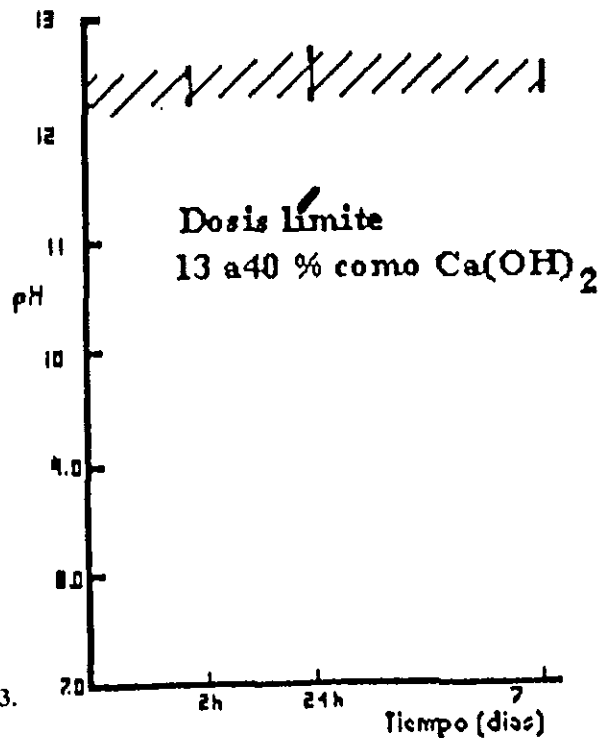
Las FIGURA 5.1. a FIGURA 5.4. muestran las curvas típicas de evolución del pH conforme se añade cal. Se aprecia que cuando la cantidad de cal es insuficiente el pH tiende a restablecerse.

FIGURA 5.1. EJEMPLO DEL DECAIMIENTO DEL pH EN LA ESTABILIZACIÓN CON CAL EN UN PROCESO ESTÁNDAR (contacto líquido-líquido)



Water Environment Federation, 1993.

FIGURA 5.2. EJEMPLO DEL DECAIMIENTO DEL pH PARA LA ESTABILIZACIÓN CON CAL MEDIANTE LA ADICIÓN DE CAL VIVA SECA A UNA MEZCLA DE LODO CRUDO PRIMARIO / LODO ACTIVADO.



Water Environment Federation, 1993.

FIGURA 5.3. CAMBIO DEL pH DURANTE EL ALMACENAMIENTO DE UN LODO PRIMARIO USANDO DIFERENTES DOSIS DE CAL.

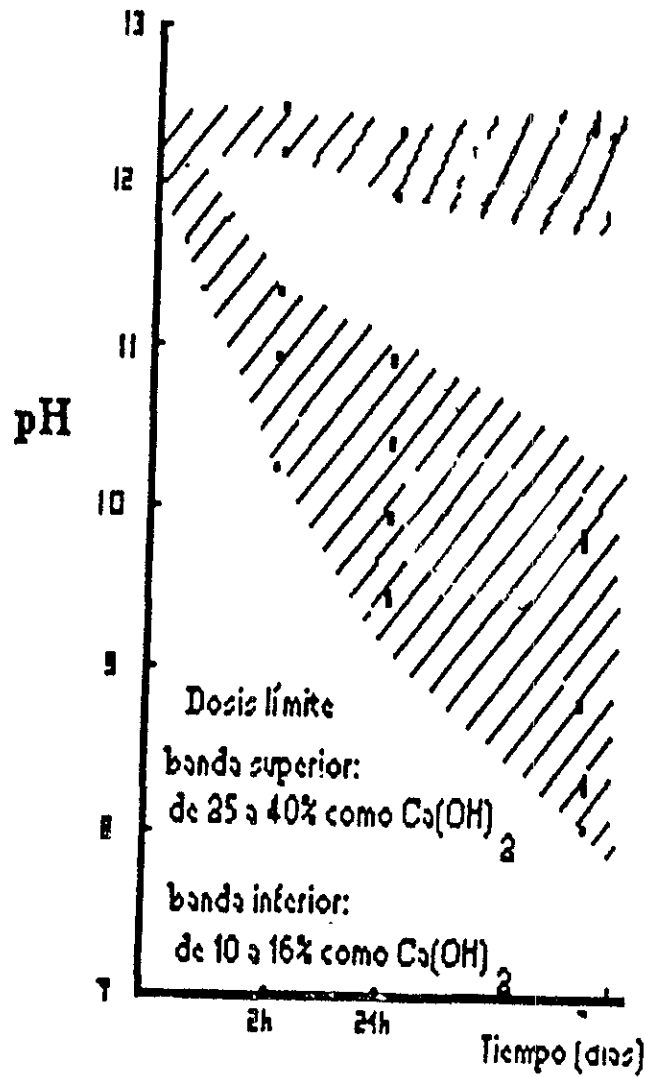
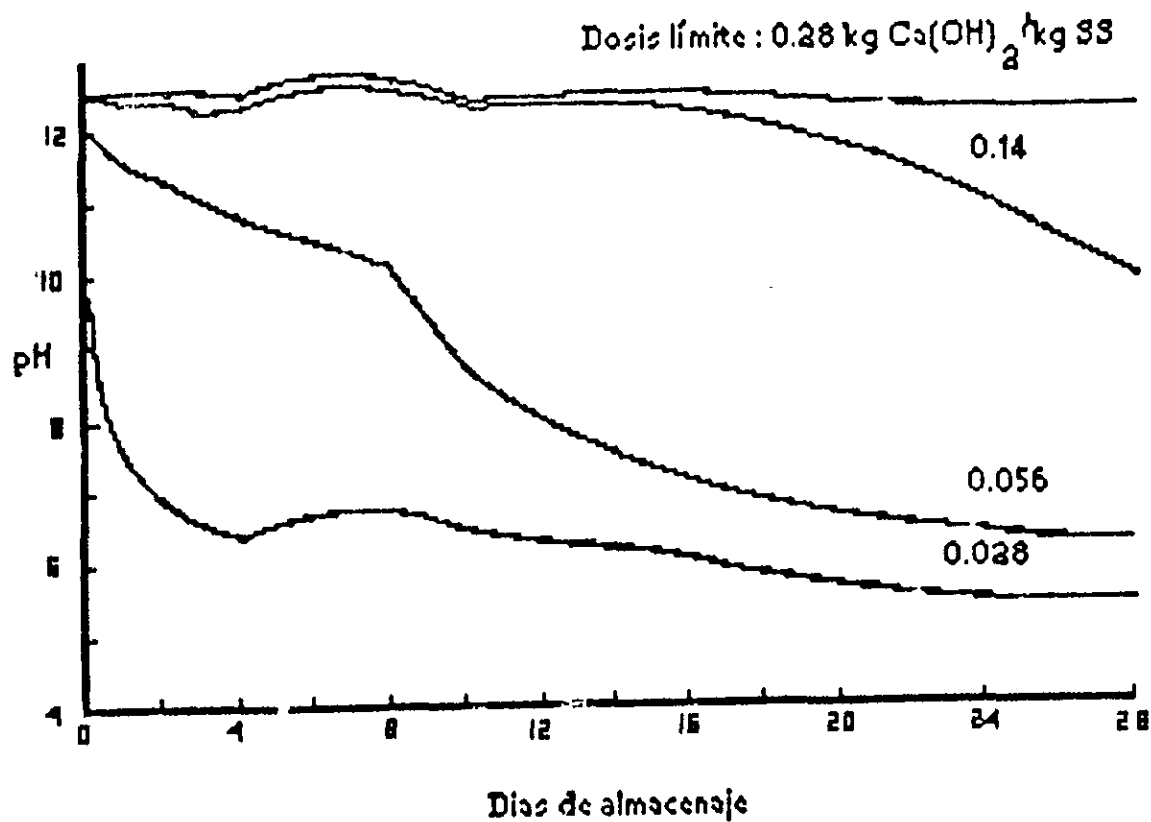


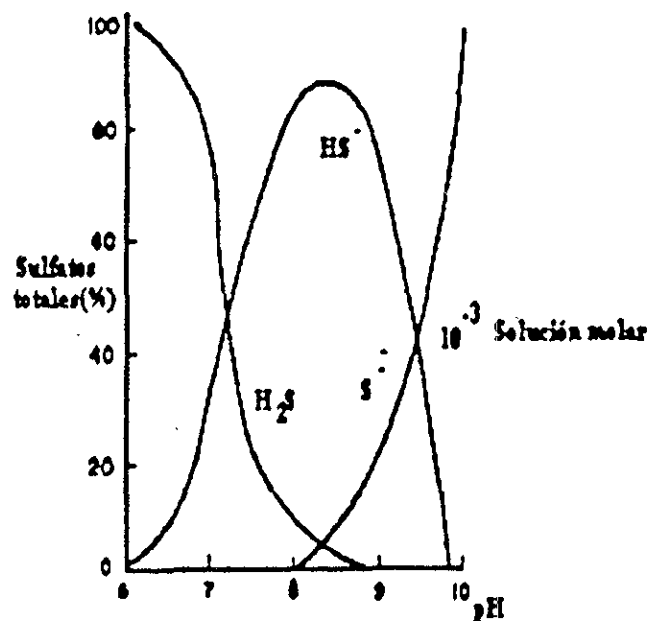
FIGURA 5.4. EJEMPLO DEL DECAIMIENTO DEL pH PARA LA ESTABILIZACIÓN CON CAL DESPUÉS DE SU FILTRACIÓN POR VACÍO.



En este proceso, la reducción de patógenos es de 99%. Se dispone de poca información sobre la remoción de virus, aunque hay indicios de su destrucción a pH de 12. En contraste, observaciones microscópicas demuestran la sobrevivencia de organismos superiores como parásitos intestinales, quistes de amiba y huevos de ascaris después de 24 horas aun con pH elevados (Water Environment Federation, 1993).

Al inicio del tratamiento y con sistemas de mezclado con aire, el olor se incrementa por la desorción de gases, en especial el amoníaco. Pasado este punto los olores decrecen en un factor de 10. Los olores debidos al H_2S se controlan por su transformación a compuestos no volátiles a un pH mayor de 9 (FIGURA 5.5.).

FIGURA 5.5. EFECTO DEL pH EN EQUILIBRIO ENTRE EL SULFATO DE HIDRÓGENO Y SULFATO IONIZADO NO VOLÁTIL



Water Environment Federation, 1993.

Los cambios químicos durante el proceso incluyen:

- Reducción en la concentración, no en la masa, de los sólidos suspendidos volátiles entre un 10 y un 35% como resultado de su dilución con cal. Existe además una pérdida en menor grado de orgánicos volátiles en la atmósfera.
- Incremento de la concentración de los sólidos suspendidos totales como resultado de la adición de la cal y la precipitación de sólidos disueltos.
- Reducción del fósforo soluble (ortofosfatos) por su precipitación como fosfato cálcico.
- Disminución del contenido de amoníaco por su desorción, que es limitada a menos que se agiten fuertemente los lodos o que se apliquen en el terreno cuando aun tienen un pH elevado.
- Incremento de la alcalinidad total.

5.3. INFRAESTRUCTURA.

Son tres operaciones básicas que intervienen en el proceso:

- El manejo de la cal.
- El mezclado cal/lodo.
- El almacenamiento.

En especial se debe tener cuidado con el almacenamiento del lodo estabilizado antes de su disposición, cuya dimensión debe de ser estimada con previsión a la interrupción del proceso para el mantenimiento preventivo y correctivo.

5.3.1. Manejo de la Cal.

Una decisión básica es la selección del tipo de cal que se emplea. Existen muchas variedades, desde aquellas de muy elevada calidad que provienen de la molienda de conchas de ostras o almejas, hasta de calidad muy baja como las dolomíticas. La selección depende de su disponibilidad y valor económico.

Como formulación química, las dos principales clases de cal que existen son:

- Cal hidratada o apagada, $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
- Cal viva, CaO .

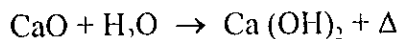
5.3.1.1. Cal Hidratada.

La cal apagada o hidratada es una suspensión líquida. Tiene mayor costo de producción y transporte (aproximadamente 30% en relación con la cal viva) pero el costo de operación es menor debido a su hidratación. Generalmente se emplea para plantas pequeñas. La alimentación de cal hidratada seca se emplea muy poco porque es más fácil de transportarla y mezclarla con el lodo en forma de lechada, lo que hace la reacción más eficiente. La cal sin apagar no puede ser eficientemente añadida al lodo debido a que el apagado requiere importantes volúmenes de agua para evitar su apelmazamiento y que grandes cantidades de cal permanezca sin reaccionar.

5.3.1.2. Cal Viva.

La cal viva resulta más económica cuando el consumo diario es superior a 3 o 4 toneladas. La alimentación de la cal viva se hace por lo regular en forma de suspensión (lechada de cal). En este caso el mezclado debe ser muy eficiente.

La cal viva reacciona con el agua de acuerdo con:



Esta reacción tiene dos ventajas:

- a) Parte del agua queda adherida a la cal, lo que incrementa la habilidad del drenado.
- b) El calor contribuye al control de los gérmenes patógenos.

En general se añade cal a razón de 40% en peso de los lodos previamente deshidratados para producir un lodo que en Estados Unidos tiene un valor comercial (CNA, 1995).

Las diferencias básicas entre la cal viva o la apagada es el empleo del equipo para hidratar. El hidratado puede efectuarse tanto en operación continua como por lote. La operación por lote es más apropiada para pequeñas instalaciones, pero el empleo de cal viva es menos recomendable para estas instalaciones. El proceso de apagado consiste en mezclar aproximadamente una parte de cal viva con dos a tres partes de agua para formar una pasta de cal. Se debe dejar reposar esta pasta aproximadamente 30 minutos para tener una hidratación completa.

La reacción es exotérmica y el incremento de la temperatura es benéfico para una adecuada hidratación. Puede llegar a ocurrir que en pequeñas áreas se llegue al punto de ebullición y haya salpicaduras con los consiguientes problemas de seguridad.

5.3.1.3. Suministro.

La forma de suministro de cal depende tanto de la cantidad como de la forma de presentación. La cal se encuentra disponible en costales o sacos, así como en contenedores a granel.

5.3.1.4. Transporte.

Los bultos pueden ser transportados con sistemas mecánicos o neumáticos y almacenados en depósitos de concreto o acero. La cal en bolsas debe ser guardada en un cuarto cerrado para evitar el contacto con el agua y el bióxido de carbono atmosférico. Debido a que en el proceso de apagado se produce calor, la cal viva no debe ser guardada junto con materiales combustibles para prevenir accidentes.

5.3.1.5. Almacenamiento.

Tanto con la cal viva como la hidratada se tiene el problema que durante el almacenamiento reaccionan con el bióxido de carbono atmosférico para formar carbonato de calcio que recubre las partículas, haciéndolas menos reactivas y disminuyendo la eficiencia del proceso.

La cal viva, además, reacciona con la humedad del ambiente produciendo su apelmazamiento y dificultando las operaciones de alimentación e hidratación. La capacidad de almacenamiento debe ser como mínimo para una semana suponiendo de preferencia suministros cada 2 a 3 semanas.

La cal hidratada puede ser guardada hasta por una semana sin alteraciones serias. La cal viva se deteriora más rápido y no debe ser almacenada por más de 3 a 6 meses. El almacenamiento de cal viva en gránulos se puede hacer en una tolva con una pendiente mínima de 60 grados. Cuando se guarda cal viva pulverizada o cal hidratada en bultos, se requiere algún tipo de mezclado para evitar el apelmazamiento.

La cal es un componente cáustico y tóxico por lo que se requiere un manejo y almacenamiento seguros. En especial, se debe contar con lava ojos y regaderas.

5.3.2. Mezcla Cal/Lodo.

5.3.2.1. Dosificación.

Los sacos se prestan para su automatización más fácilmente. Un alimentador de reactivo en seco dosifica en forma constante la cal para su suspensión. Estos alimentadores son del tipo volumétrico o gravimétrico. Los de tipo volumétrico suministran un volumen constante independientemente de la densidad del producto. En cambio, los gravimétricos, aportan una masa constante y permiten un control más preciso. El inconveniente es que el dosificador gravimétrico cuesta el doble del volumétrico así que se debe analizar cuál es el tipo adecuado para una planta.

Se debe contar con un equipo de limpieza a base de ácido clorhídrico diluido para remover los depósitos de carbonato de calcio de las bombas y tuberías. Por lo tanto, todos los dispositivos deben ser capaces de soportar soluciones ácidas. Ayuda mucho el empleo de tubos flexibles para evitar los depósitos.

La alimentación por gravedad es más recomendable que mediante el bombo. La suspensión con cal puede ser abrasiva, en particular si se emplea cal granulada de baja calidad.

5.3.2.2. Tanque de Mezcla de Lodo.

Los tanques con la suspensión se agitan con aire comprimido, chorros de agua o agitadores mecánicos. La suspensión es transferida al tanque de mezcla de lodos conforme se necesita.

Este proceso de transferencia es la principal fuente de problemas de operación. La suspensión reacciona con los bicarbonatos de la alcalinidad del agua y con el bióxido de carbono atmosférico para formar un precipitado de carbonato de calcio que puede tapar los conductos. Este problema se incrementa con la longitud de los tubos de conducción, la cantidad de alcalinidad y el bióxido de carbono presente. En consecuencia, los tanques para la suspensión deben ser colocados lo más cerca posible de los tanques de mezclado. Dispositivos que ocasionen turbulencias, como los vertedores de rebose se deben evitar para no exponer la mezcla a la atmósfera.

Su función básica es el mezclado de los lodos con la suspensión de cal durante un tiempo apropiado. El tiempo de contacto una vez alcanzado un pH de 12.5 es de 30 minutos. El tiempo exacto debe ser determinado en forma experimental. El tanque puede ser de acero al carbón y su dimensionamiento depende de si el proceso es en forma batch o continua.

El trabajo por lote es común en instalaciones pequeñas. La capacidad debe ser suficiente para tratar la producción diaria en un turno de operación. En estas condiciones, el tanque mismo puede ser empleado como espesador.

En los sistemas continuos, el pH y el volumen se mantienen constantes. En general, la unidad es más pequeña que la equivalente a un proceso por lotes. Para asegurar que las condiciones del proceso se cumplen es necesario tener un monitoreo continuo del pH.

Los tanques de mezcla de lodos deben proveer un buen mezclado para mantener los sólidos en suspensión y distribuir la cal eficientemente. Los sistemas más comunes de mezclado son los agitadores mecánicos y la insuflación de aire, siendo el último el más común.

El aire ayuda además a mantener el lodo fresco y evitar la deposición de desechos en el tanque (siempre y cuando se utilicen sistemas no taponables). Los sistemas con aire tienen la desventaja de que favorecen la desorción del amoníaco creando problemas de olor y disminuyendo el valor del lodo como fertilizante. Además, favorecen la adsorción en la mezcla del bióxido de carbono, lo que incrementa el consumo de cal.

Finalmente, la desorción de gases motiva que los tanques se encuentren en instalaciones cerradas y se deba contar con un sistema de tratamiento de gases.

El criterio de diseño del tanque de mezcla es similar al de la digestión aerobia. Cuando se emplean sistemas de difusión de aire, éste debe ser de burbuja grande. Los difusores se colocan normalmente a lo largo de las paredes para crear un patrón espiral de mezclado. Se usan tasas de aire de 0.3 a 0.5 l/m³. Para lodos muy espesos se puede necesitar una mayor dosis.

El diseño de la agitación mecánica se basa en la velocidad del fluido y el número de Reynolds para el impulsor. La **TABLA 5.2.** muestra tamaños de agitadores para varios volúmenes. Esta tabla se basa en mantener la velocidad del fluido (capacidad de bombeo del agitador de turbina dividida entre el área transversal del tanque de mezclado) mayor a 0.13 m/s y un número de Reynolds del impulsor de 1000. Estos valores son adecuados para lodos con una concentración hasta del 10% y viscosidad hasta de 1 Pa.s (1000 cP).

5.3.2.3. Alternativas para el mezclado.

Se pueden emplear dos tanques de mezclado, el primero para elevar el pH a más de 12 y el segundo para dar el tiempo de retención deseado. Otra opción es el emplear tornillos para mezclar la cal (viva o apagada) con los lodos deshidratados.

No hay requerimientos especiales para el equipo de deshidratación. Hay muchos problemas de abrasión, corrosión y depósitos cuando se emplea equipo mecánico en la post-estabilización.

En la post-estabilización, el buen mezclado es un factor crítico para evitar formaciones de material putrescible. Un sistema muy efectivo es un molino con dobles paletas mezcladoras.

5.3.2.4. Requerimientos de Operación.

Cuando el proceso es ineficiente los resultados no se aprecian en forma rápida por lo que un adecuado control del proceso es indispensable. La ausencia de olores y un buen drenado en la planta no son indicativos de una correcta estabilización. El empleo de electrodos de pH y su adecuado mantenimiento preventivo y correctivo son necesarios. El efectuar exámenes microbiológicos en forma periódica es necesario para monitorear coliformes fecales y estreptococos.

5.3.2.5. Requerimientos Físicos y Energéticos.

El requerimiento de cal varía con la cantidad y tipo de lodos producidos. Se requiere más cal para tratar lodos con aluminio que lodos brutos (probablemente por la formación de aluminato de calcio), y menos para lodos provenientes de un proceso con fierro.

TABLA 5.2. ESPECIFICACIONES MECÁNICAS DEL MEZCLADO PARA LA SUSPENSIÓN DEL LODO

TAMAÑO DEL TANQUE (m ³)	DIÁMETRO DEL TANQUE (m)	TAMAÑO DEL MOTOR (kW)	VELOCIDAD EN EL EJE (rpm)	DIÁMETRO DE LA TURBINA (m)
19	2.9	6	125	0.8
		4	84	1.0
		2	56	1.1
57	4.2	15	100	1.1
		11	68	1.3
		7	45	1.6
		6	37	1.7
114	5.2	30	84	1.5
		22	68	1.6
		19	56	1.7
		15	37	2.1
284	7.1	75	100	1.6
		56	68	1.9
		45	56	2.0
		37	45	2.2
380	7.8	93	84	1.8
		75	68	2.0
		56	45	2.4

ADAPTADO POR: WATER ENVIRONMENT FEDERATION, 1993.

NOTA

Velocidad del fluido > 0.13 m/s.

Número de Reynolds del impulsor > 1000

Configuración del tanque de mezclado

- La profundidad del líquido deber ser igual al diámetro del tanque
- Mamparas de 1/12 del tanque deben ser colocadas en la periferia con un ángulo de 90°

El empleo de cal se relaciona también con sus características (TABLA 5.3.). Durante la estabilización el principal consumo energético es para el mezclado. En forma general, el consumo anual se puede estimar suponiendo 2.2 GJ/(L/s) de aire inyectado, para abastecimiento de aire y de 31 MJ/W de potencia de los aireadores, para mezclado mecánico.

El principal consumo global de energía se debe a la producción de cal. Los procesos antiguos emplean una gran cantidad de energía para producir cal viva. Las plantas modernas usan hornos muy eficientes y tienen consumos menores de energía.

TABLA 5.3. CARACTERÍSTICAS DE LA CAL

FORMULA	PRESENTACIONES	REQUERIMIENTOS DE LOS CONTENEDORES	PROPIEDADES Y APARIENCIA	DENSIDAD DEL FLUIDO	FUERZA COMERCIAL	SOLUBILIDAD EN AGUA
Cal viva CaO	Gránulos Polvo Pulverizada	4 a 50 kg. Bolsas a prueba de humedad, barriles de madera o furgones. Almacenamiento en seco, máximo 60 días en contenedores estrechos o 3 meses en bolsas a prueba de humedad.	Blanca (ligeramente gris). Inestable, cáustica e irritante. Se hidrata a una suspensión de hidróxido liberando 1.1 MJ/kg. Reacciona con el CO ₂ del aire para producir CaCO ₃ . Saturación de solubilidad a pH de 12.5	880 a 1200 kg/m ³ . Para el cálculo de la capacidad de tolva emplear 880 kg/m ³ . Peso específico entre 3.2 y 3.4	70 a 96% de CaO (menos de 88% puede indicar mala calidad).	Reacciona para formar Ca(OH) ₂ . Cada unidad de cal viva forma de 1.16 a 1.32 de Ca(OH) ₂ , con 2 a 12 % de arena, en función de la pureza.
Cal hidratada Ca(OH) ₂	Polvo (malla 200, apertura 0.053 mm)	Sacos de 25 kg, barriles de 50 kg y furgones. Almacenamiento en seco, máximo 1 año.	Blanca, malla 200 a 400 (apertura 0.053 a 0.058 mm), polvo libre de gránulos, cáustico, polvo irritante, absorbe CO ₂ y H ₂ O del aire para formar Ca(HCO ₃) ₂ . Saturación de solubilidad de pH de 12.4	400 a 600 kg/m ³ . Para el cálculo de la capacidad de la tolva emplear 480 kg/m ³ . Gravedad específica entre 2.3 y 2.4	Ca(OH) ₂ , 82 al 98%. CaO, 62 al 74 % (estándar 70%).	1.2 E-3 kg/m ³ a 21°C 6.7 E-4 kg/m ³ a 79°C

Jiménez, 1995.

5.4. PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS PRODUCIDOS POR EL TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO Y LA ESTABILIZACIÓN CON CAL.

En la TABLA 5.4. se presentan los valores típicos de lodos provenientes del tratamiento primario avanzado, resultados obtenidos en un estudio específico para el caso.

TABLA 5.4. CARACTERIZACIÓN DE LODOS PROCEDENTES DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO Y TRATABILIDAD CON ÓXIDO DE CALCIO E HIDRÓXIDO DE CALCIO.

PARÁMETROS.	UNIDADES.	LODO PURGA DEL SEDIMENTADOR.			LODO DEL ESPESADOR.		
		LODO	L.E. CaO	L.E. Ca(OH) ₂	LODO	L.E. CaO	L.E. Ca(OH) ₂
Cal empleada	g cal/g lodo		0.32	0.35		0.59	0.45
pH	pH	6.8	12.2	12.2	6.3	12.17	12.37
Sólidos totales	%	7	18	18	8	16	14
Sólidos totales volátiles	%ST	35	20	25	36	8	13
Sólidos totales fijos	%ST	65	81	75	64	92	87
Nitrógeno	mg N/kg lodo	2096	1228	1226	2176	1305	1376
Fósforo	mg P-PO ₄ /kg lodo	472	177	175	568	209	217
Coliformes fecales	NMP/100 ml	3.46E+05	Ausente	Ausente			
Huevos de Helminto	NTHH/gST	87	23	27	5	2	3
Salmonella	UFC/100ml	265	Ausente	Ausente			

L. E. CaO. Lodo estabilizado con cal viva.

L. E. Ca(OH)₂. Lodo estabilizado con cal apagada.

Jiménez, 1995.

5.5. BALANCE DE MATERIA DEL TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO Y ESTABILIZACIÓN CON CAL DE LOS LODOS PARA EL CASO DE ESTUDIO.

El balance de materia es un procedimiento de cálculo que de acuerdo a las condiciones de operación del proceso, permite definir el volumen de lodo que será generado a lo largo del tren de tratamiento y servir de base para el diseño de las estructuras necesarias.

Los balances de materia que se presentan a continuación corresponden a:

Tratamiento Primario Avanzado con estabilización con cal de los lodos (44 m³/s).

TABLA 5.5. BASES DE DISEÑO DEL TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO CON ESTABILIZACIÓN CON CAL DE LOS LODOS.

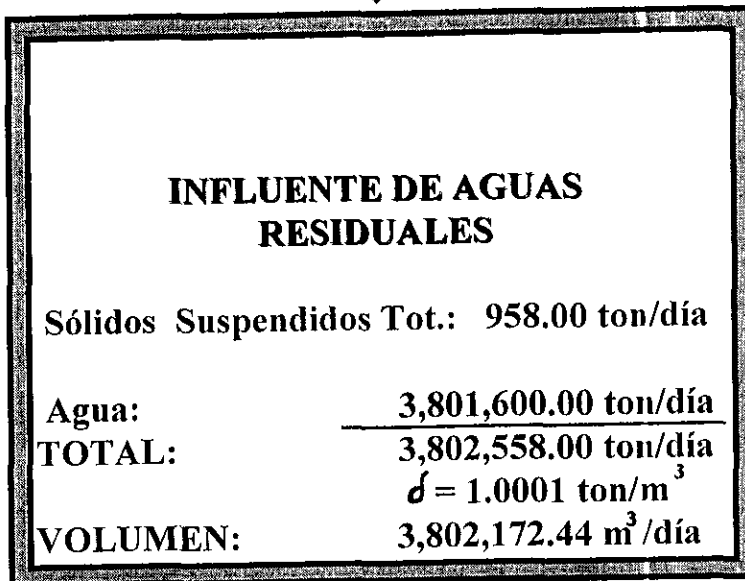
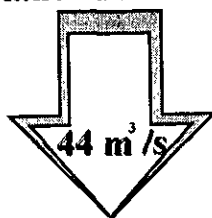
DATOS DE DISEÑO	VALOR
**Gasto	44 m ³ /s
**Volumen anual tratado	1,387.58 x 10 ⁶ m ³ /año
**SST influente	252 mg/l
**Dosis de coagulante (Sulfato de Aluminio) para el Tratamiento Primario Avanzado	50 mg/l
**Concentración de sólidos en el lodo primario	2 %
**Concentración de sólidos en lodo espesado	7 %
**Concentración de sólidos en lodo deshidratado	22 %
**Concentración de sólidos en lodo estabilizado	27 %
**Dosis de Ca(OH) ₂	0.3 Ton Ca(OH) ₂ /Ton lodo
*Cálculo del peso específico de los sólidos	$\frac{1}{S_s} \approx \frac{\%SSV \times 100}{S_{ssv}} + \frac{\%SSF \times 100}{S_{ssf}}$
*Cálculo del peso específico del lodo	$\frac{1}{S_l} \approx \frac{\%SST \times 100}{S_{ss}} + \frac{\%Agua \times 100}{S_{agua}}$

S, Peso específico.

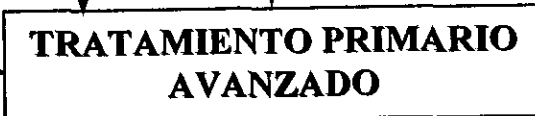
* Metcalf and Eddy, 1991.

**CNA, 1995.

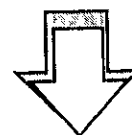
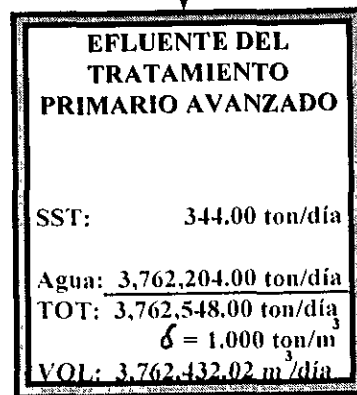
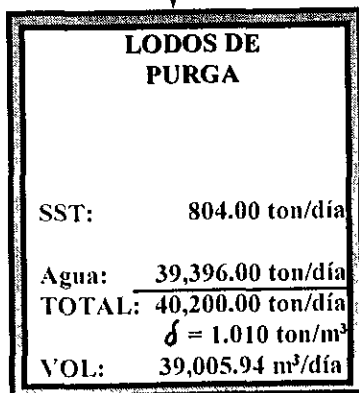
ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO (balance de materia)



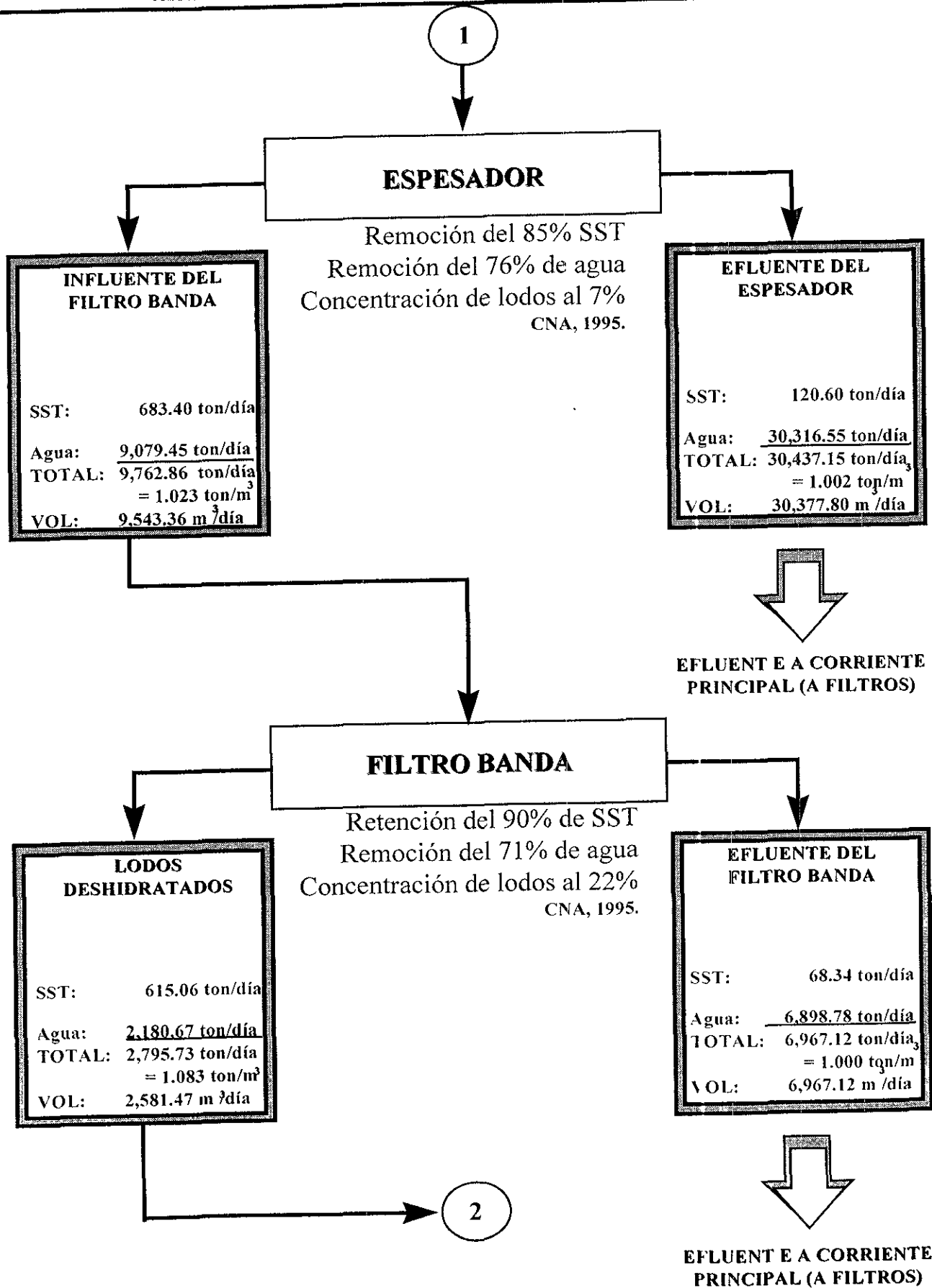
Coagulante
(Sulfato de Aluminio)
190 ton/d

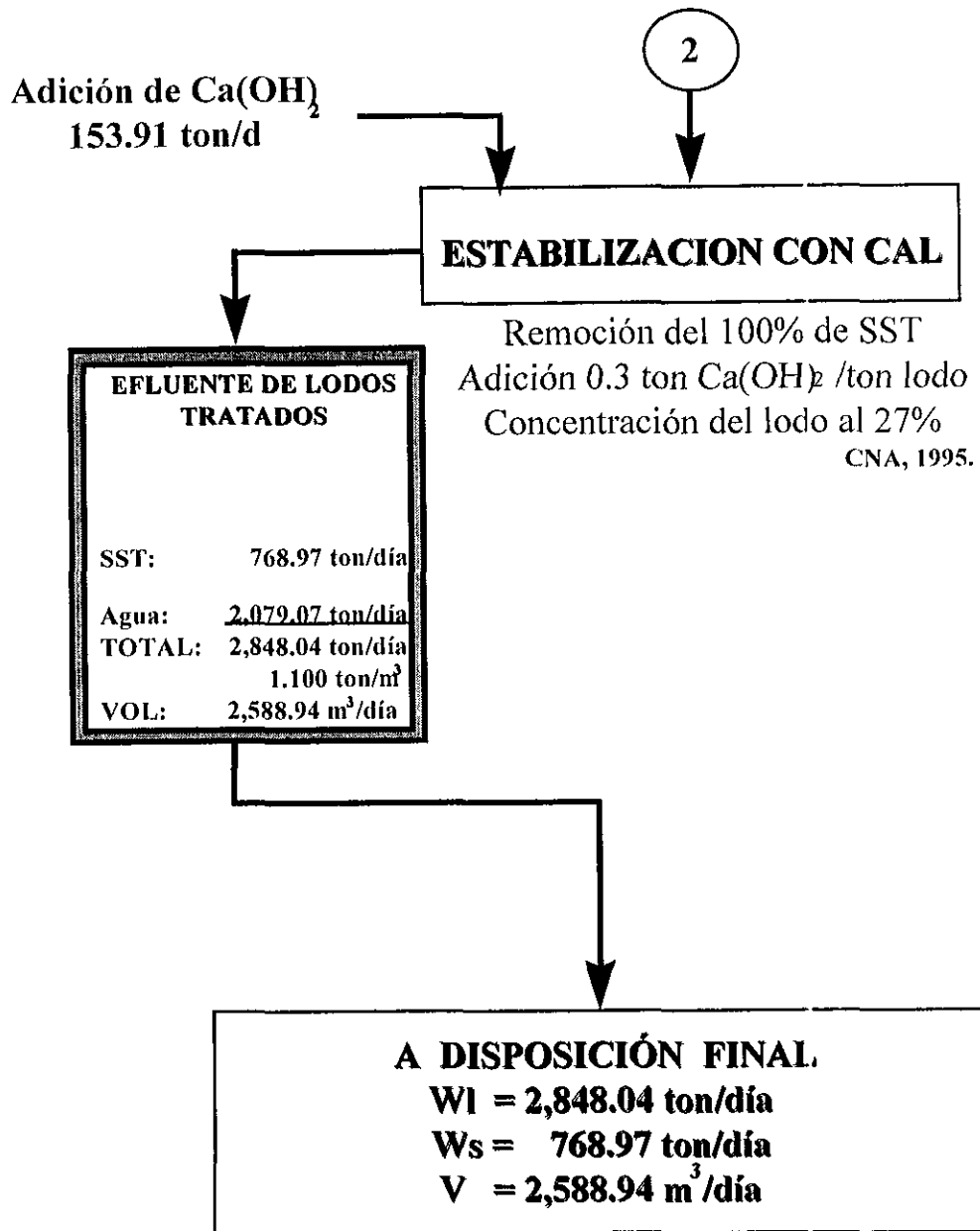


Remoción del 70% de sólidos
Concentración de lodos al 2%
CNA, 1995.



EFLUENTE A FILTROS Y A DESINFECCIÓN





CAPÍTULO 6

DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LODOS

6.1. INTRODUCCIÓN.

Durante el proceso convencional de tratamiento biológico de aguas residuales, el contenido de sólidos (0.01 a 0.1%), es acumulado en los lodos primarios que contienen 2% al 8% de sólidos. Los componentes solubles del agua residual son convertidos a través de sistemas biológicos en biomasa. Esta es concentrada en los lodos secundarios. Ambos tipos de lodos contienen una gran cantidad de materia biodegradable, que debe ser estabilizada y deshidratada antes de su disposición final. En la **TABLA 6.1.** se presentan algunos parámetros importantes.

TABLA 6.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS LODOS.

COMPONENTE	TIPO DE LODO			
	SIN TRATAMIENTO		TRATADOS	
	PRIMARIO	ACTIVADO	PRIMARIO	PRIMARIO Y ACTIVADO
Contenido de sólidos del lodo (%)	2.0 - 8.0	0.5 - 1.5	5.0 - 10.0	2.5 - 7.0
Sólidos Volátiles (%ST)	60 - 80	65 - 75		30 - 60
Grasas y Aceites (%ST)	6 - 30			5 - 20
Celulosa (%ST)	8 - 15			8 - 15
Proteínas (%ST)	20 - 30			15 - 20
Fósforo (%ST)	0.8 - 3.0			1.5 - 4.0
Nitrógeno (%ST)	1.5 - 6.0			1.6 - 6.0

%ST = porcentaje de los sólidos totales.

Van Haandel y Lettinga, 1994

La digestión anaerobia ha sido, en los últimos años, tema de interés para los profesionales en la materia. Este sistema ha probado ser una herramienta poderosa en el desarrollo de nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales y lodos.

La digestión anaerobia es un proceso de fermentación y mineralización en el que la materia orgánica biodegradable es convertida a compuestos orgánicos e inorgánicos, principalmente a metano y a bióxido de carbono.

Los procesos microbiológicos involucrados en la digestión anaerobia, gracias a los cuales es posible la transformación de la materia orgánica presente en el agua residual (polímeros orgánicos complejos) a una mezcla gaseosa de metano bióxido de carbono, nitrógeno y ácido sulfhídrico (biogás) y a nuevo material celular, se llevan a cabo por medio de reacciones bioquímicas que son realizadas por varios grupos de bacterias.

La digestión anaerobia estabiliza los sólidos biodegradables eliminados del agua residual, con los siguientes efectos:

- Producción de lodos inertes (materia orgánica degradable ya agotada).
- Reducción de malos olores, contenido bacteriano, volumen y peso de los lodos.
- Reducción de costos en la disposición final.
- Protección de la salud pública y de medio ambiente.

La digestión anaerobia es un método de estabilización de lodos que merece especiales consideraciones para su uso en plantas de tratamiento de aguas residuales, por las siguientes razones:

- Mayor eficiencia en la energía utilizada en el proceso.
- Producción de una fuente de energía (metano).
- Costos globales competitivos (inversión y operación).
- Producción de menor cantidad de lodos para su disposición final.

6.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

La digestión anaerobia es un proceso bioquímico de varias etapas que se lleva a cabo en diferentes tipos de materia orgánica. La digestión de los lodos ocurre en cuatro etapas básicas en el proceso global (Van Haandel y Lettinga, 1994), que son:

6.2.1. Hidrólisis.

Es la primera etapa de la digestión anaerobia. Consiste en la disolución de polímeros orgánicos complejos, como proteínas, carbohidratos y lípidos, por medio de su transformación en aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga. La hidrólisis se lleva a cabo con la mediación de enzimas producidas por bacterias fermentativas y es el paso que permite a las bacterias anaerobias tener disponibilidad de la materia orgánica ya solubilizada, la cual puede ser transportada a través de su membrana celular, ya que en su forma particulada esto no es posible.

6.2.2. Acidogénesis.

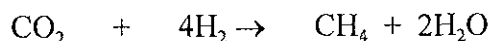
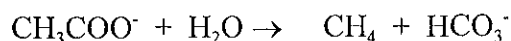
Los compuestos disueltos en la hidrólisis, tales como aminoácidos y azúcares, son captados por las células de las bacterias fermentativas en una segunda etapa conocida como acidogénesis. Estas bacterias, en su mayoría anaerobias obligadas, excretan compuestos orgánicos más simples, tales como: ácidos grasos volátiles (acético, butírico y propiónico), alcoholes, ácido láctico y compuestos inorgánicos como CO_2 , NH_4 , H_2 y H_2S . Estos microorganismos han sido referidos como bacterias acidogénicas o formadoras de ácidos por varios autores.

6.2.3. Acetogénesis.

De los ácidos grasos de cadena larga y como otros productos de la formación de ácidos grasos volátiles se forma, sin intermediarios, acetato e hidrógeno. Sin embargo, en la acetogénesis, los productos de la acidogénesis son convertidos en acetato, hidrógeno y bióxido de carbono. En este proceso intervienen las llamadas bacterias acetógenas productoras obligadas de hidrógeno (OHPA por sus siglas en inglés).

6.2.4. Metanogénesis.

En esta última etapa de la digestión anaerobia se produce metano a partir de acetato e hidrógeno, a través de las siguientes reacciones químicas:



La metanogénesis a partir de acetato involucra una fermentación con bacterias acetótrofas (acetoclásticas). En la producción de metano a partir de hidrógeno se realiza una reducción de bióxido de carbono por medio de H_2 con la ayuda de bacterias hidrogenótrofas (hidrogenófilas). Es factible que el bióxido de carbono proveniente de la oxidación del acetato pueda ser reducido a metano con la oxidación del hidrógeno. Se sabe que algunas bacterias metanógenas también utilizan formiato y en menor medida alcoholes y CO como agentes reductores.

Estos pasos se resumen esquemáticamente en la **FIGURA 6.1**.

6.2.5. Etapa Limitante.

Una digestión exitosa requiere de un balance entre la producción y el consumo de los intermediarios en las cuatro etapas de la digestión anaerobia. La etapa limitante es aquella en la que la conversión de los desechos es lenta. Por lo tanto, las etapas 1 y 4 son consideradas limitantes.

En la primera etapa de la digestión anaerobia (Hidrólisis), la descomposición de materia orgánica compleja a ácidos orgánicos grasos es lenta, aunque puede acelerarse al agregar catalizadores (enzimas) o mediante tratamientos físicos o químicos específicos. Los grandes tiempos de retención y las bajas tasas de carga necesarios para una conversión máxima significa que la etapa 1 puede limitar el promedio de producción de lodos estabilizados. Otro factor que afecta es la baja temperatura a la que se lleva a cabo el proceso en esta etapa, ya que la degradación de lípidos es posible sólo por arriba de los 20 °C (Van Haandel y Lettinga, 1994).

La conversión de los ácidos orgánicos grasos a ácidos orgánicos volátiles, primeramente ácido acético, en la segunda etapa (Acidogénesis), no es generalmente una etapa crítica. Los organismos crecen rápidamente y descomponen los ácidos grasos eficientemente.

En la tercera etapa (Acetogénesis) los productos de la acidogénesis son convertidos en acetato, hidrógeno y bióxido de carbono. Proceso en el que intervienen bacterias acetógenas productoras de hidrógeno. Los organismos crecen adecuadamente y descomponen los compuestos eficientemente. Esta etapa sin embargo, tiene una relación de simbiosis con las bacterias metanogénicas hidrogenótrofas sumamente importante para el equilibrio de la digestión anaerobia, como se menciona más adelante.

En la cuarta etapa (Metanogénesis), las bacterias formadoras de metano crecen lentamente y son relativamente sensibles a factores ambientales, por lo que usualmente esta etapa limita la producción de lodos estabilizados.

Durante el proceso es necesario mantener, en el nivel más alto posible y sin sacrificio de la estabilidad del proceso, un equilibrio en el consumo de alimento y de producción de microorganismos de las etapas críticas.

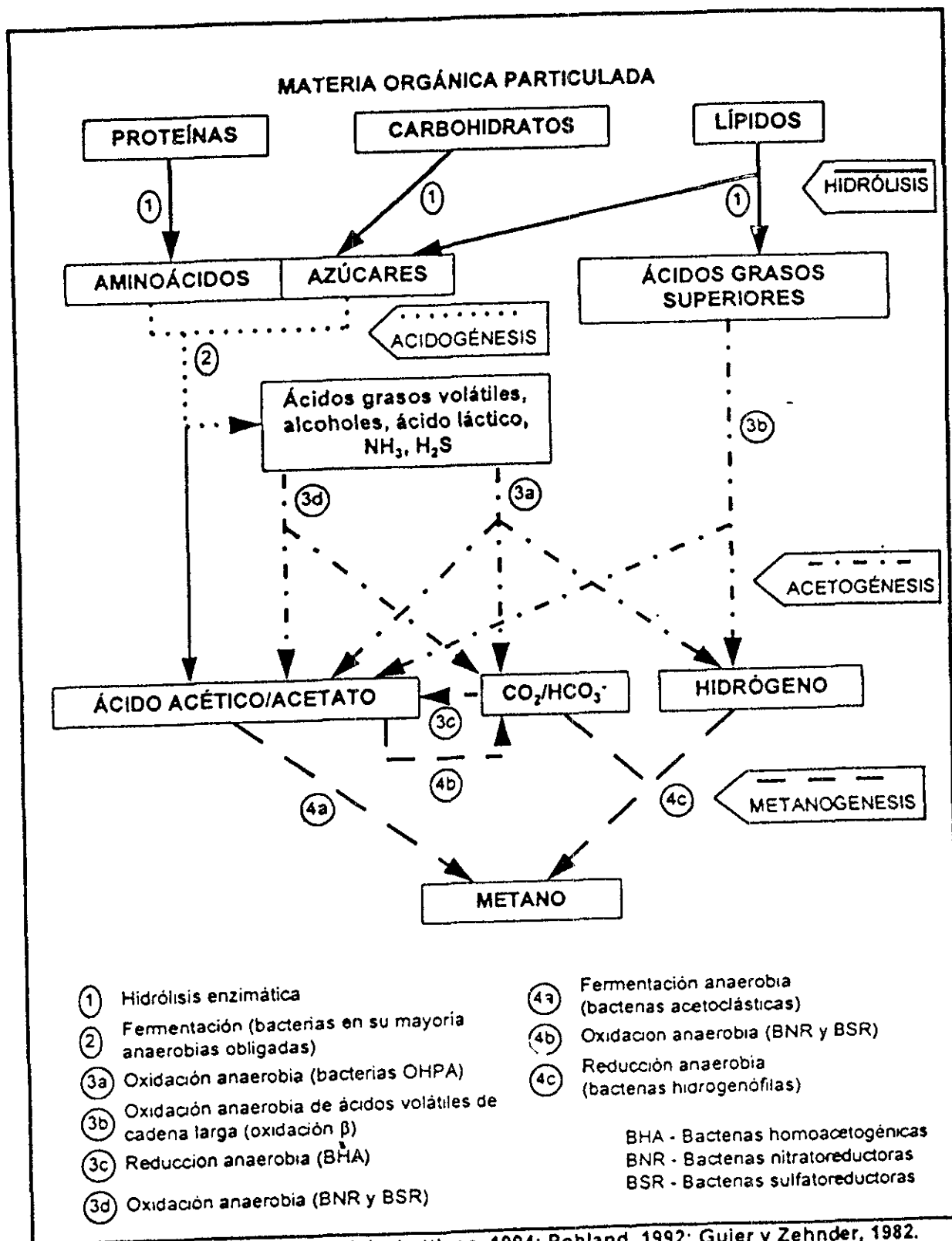
6.2.6. La Simbiosis como aspecto relevante en la Digestión Anaerobia.

En la **FIGURA 6.1.** puede apreciarse que una característica de la digestión anaerobia es su microbiología compleja y el desarrollo secuencial de las poblaciones bacterianas como resultado lógico del hecho de que los productos metabólicos de un paso son el sustrato para el paso siguiente y las relaciones particulares que puedan establecerse entre los microorganismos involucrados. Dentro de este proceso se han identificado ciertos aspectos sobre las transformaciones bioquímicas de la materia orgánica, que han sido de ayuda en la comprensión del funcionamiento y desempeño de la tecnología anaerobia. Algunos aspectos son:

- a) El crecimiento de una población suficiente de bacterias metanógenas acetoclásticas es fundamental para la remoción de materia orgánica, debido a que aproximadamente el 70% de dicha materia orgánica es convertida a metano por la mediación de estas bacterias.
- b) A pesar de que sólo el 30% de la materia orgánica es convertida a metano por bacterias metanógenas hidrogenófilas, éstas son indispensables en la digestión anaerobia por la relación simbiótica, con base en el hidrógeno, que mantienen con las bacterias acetógenas productoras de hidrógeno. El simbiosismo es un término que se aplica a la interacción sinérgica de dos o más poblaciones que se proporcionan una a la otra los requerimientos nutricionales (**Atlas y Bartha, 1993**).

Las bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno oxidan productos intermediarios a acetato con la siempre presente producción de hidrógeno, pero si la presencia de bacterias metanógenas hidrogenófilas es escasa o no hay presentes compuestos reducibles (Fe, Mn, SO₄, O₂), el hidrógeno se acumulará y la reacción de oxidación realizada por las bacterias acetogénicas productoras de hidrógeno tenderá a inhibirse, lo que repercutirá negativamente en la digestión anaerobia. La presión parcial de hidrógeno debe mantenerse a un nivel muy bajo para favorecer las condiciones termodinámicas para la conversión de ácidos volátiles y alcoholes a acetato.

FIGURA 6.1. ESQUEMATIZACIÓN DEL PROCESO DE CONVERSIÓN ANAEROBIA DE MATERIA ORGÁNICA PARTICULADA A METANO.



Fuente: Adaptado de Van Haandel y Lettinga, 1994; Pohland, 1992; Gujer y Zehnder, 1982.

c) Durante la fermentación de aminoácidos y azúcares, los ácidos producidos y otros intermediarios disociables tienden a bajar el pH del agua. Debido a que la metanogénesis sólo se lleva a cabo adecuadamente a pH neutro, aunque se sabe que puede ocurrir en medios ácidos y básicos (**Pohland, 1992**), si por alguna razón (como una sobrecarga orgánica aunada a la rapidez de las reacciones hidrolíticas y fermentativas), la rapidez de producción de ácidos supera la rapidez de la metanogénesis, entonces el pH se reduce y este último proceso se inhibe, y por consiguiente, el lodo seguirá adquiriendo un pH aun menor. Este efecto se conoce como acidificación del sistema anaerobio (**Van Haandel y Lettinga, 1994**).

6.3. CINÉTICA DE LA REACCIÓN EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.

Uno de los factores limitantes de la digestión anaerobia y que se hace evidente en el tratamiento de aguas residuales diluidas, como las municipales, son las rapidezces de reacción menores involucradas en el proceso, en comparación con las de los procesos aerobios. Este hecho, junto con la tasa de crecimiento propia de los microorganismos anaerobios, determinan el límite de remoción de materia orgánica de un proceso anaerobio.

La rapidez de utilización de un sustrato por bacterias ($-dS/dt$; mg SSV/L d) puede describirse por el modelo cinético de Monod:

$$-dS/dt = kXS/(K_s + S)$$

donde:

- k es la rapidez máxima específica de utilización de sustrato (mg DQO/mg SSV d).
- X es la concentración de microorganismos (mg SSV/L).
- S es la concentración de sustrato (mg DQO/L).
- K_s es el coeficiente de afinidad por el sustrato o coeficiente de rapidez media (mg DQO/L). Concentración de sustrato a la cual se tiene la mitad del valor máximo de rapidez de crecimiento.

De la ecuación anterior se observa que si la concentración es muy grande, la relación $S/(K_s+S)$ se aproxima a 1 y la rapidez de utilización se convierte independiente de la concentración de sustrato (cinética de cero orden). Sin embargo, si la concentración de sustrato es muy pequeña ($S \ll K_s$), la rapidez de utilización de sustrato es proporcional a la concentración de sustrato (cinética de primer orden).

La rapidez neta de crecimiento de microorganismos (dX/dt ; mg SSV/L d) está relacionada con la rapidez de utilización del sustrato:

$$dX/dt = YkXS/(K_s + S) - bX$$

donde:

- Y es el coeficiente de rendimiento (mg SSV/mg DQO).
- b es el coeficiente de decaimiento (1/d).

En estado estacionario, el crecimiento de microorganismos se iguala al decaimiento, $dX/dt=0$. Entonces, de la ecuación anterior puede calcularse la concentración de sustrato a la cual el crecimiento y decaimiento de microorganismos están en balance ($S_{mín}$):

$$S_{mín} = bK_s / (Yk - b)$$

Con un sustrato tan complejo como el residual municipal, para el cual el número de especies de bacterias anaerobias involucradas en la conversión de materia orgánica es grande, se tendrá una cinética global muy compleja. Cada especie seguirá su propia cinética de reacción, posiblemente, siguiendo los modelos planteados en las ecuaciones anteriores. Como consecuencia, cantidades de sustratos particulares de cada microorganismo permanecerán en el efluente con una concentración igual o mayor a la $S_{mín}$ respectiva. La concentración total de sustrato biodegradable remanente en el efluente será igual o mayor que la suma de los valores de $S_{mín}$ correspondientes a todos los sustratos o compuestos intermedios formados ($\sum S_{mín}$). Por esta razón, el tratamiento anaerobio tiene una limitación propia de la cinética anaerobia, en la remoción máxima de materia orgánica, asociada ésta con el coeficiente de afinidad por el sustrato (K_s).

Aunque esta limitación se ha reducido con los procesos anaerobios de alta tasa, al favorecerse una mayor retención de la biomasa, existe un punto más allá del cual no puede removerse más materia orgánica biodegradable. Además, existen partículas y materia coloidal no biodegradable o materia orgánica biodegradable cuyas cinéticas de degradación son muy lentas para permitir su remoción anaerobia con los tiempos de retención frecuentemente empleados en reactores anaerobios de alta tasa.

6.4. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE IMPORTANCIA.

Los principales factores del medio que influyen fuertemente en la realización de la digestión anaerobia son el pH, la alcalinidad, la temperatura, los macro y micronutrientes y la eventual presencia de compuestos tóxicos inhibidores

6.4.1. pH y Alcalinidad.

Los procesos anaerobios metanogénicos operan mejor en un medio con valores de pH cercanos a 7, por lo que variaciones grandes de este valor provocan una influencia negativa al proceso de anaerobiosis y la solubilidad y reactividad de muchas sustancias. Es sabido que la mayoría de las bacterias se desarrollan óptimamente en el intervalo de pH de 6.2 a 7.8, con preferencia entre 7.0 y 7.2.

Los digestores anaerobios tienen capacidad de amortiguamiento a cambios de pH, debido a la presencia de sistemas ácido base como el carbónico, ortofosfórico y amoniacal. En la mayoría de los casos, es el sistema carbónico que predomina. Cuando los ácidos volátiles totales son bajos en un digestor balanceado, la alcalinidad del bicarbonato es aproximadamente igual a la alcalinidad total (McCarty, 1985). Si los ácidos volátiles se incrementan, son neutralizados por la alcalinidad del bicarbonato, siempre y cuando ésta exista. Los digestores de lodos deben tener una concentración de alcalinidad de bicarbonato de 2,500 a 5,000 mg/L para neutralizar a los ácidos volátiles y prevenir un descenso en el pH.

Si el pH desciende de 6, los ácidos volátiles no ionizados se vuelven tóxicos para los microorganismos formadores de metano, al igual que el amoníaco disuelto para pH superiores a 8. Por lo tanto, el pH al incidir en los valores de las constantes de ionización del amoníaco y del ácido acético puede provocar efectos inhibidores por estos compuestos.

6.4.2. Temperatura.

La temperatura es una variable fundamental y determinante en todo proceso biológico. En el caso del tratamiento anaerobio de lodos, la temperatura del proceso determina la rapidez y el grado de avance de la digestión anaerobia.

Los microorganismos son sensibles a la temperatura. Su crecimiento es mayor mientras más alta sea la temperatura, dentro de ciertos límites. De la misma manera, los microorganismos procesan el lodo más rápido a mayores temperaturas. En general, los lodos pueden ser tratados de manera más completa a temperaturas superiores a las del ambiente.

Se ha estudiado la influencia de la temperatura en el grado de avance de la digestión anaerobia, presentándose resultados en función del grado de remoción de la materia orgánica con relación al tiempo de incubación de lodo primario, a varias temperaturas constantes. De estos resultados se observó (O'Rourke, 1968. Citado por Van Haandel y Lettinga, 1994) que a una temperatura de 35°C y con un tiempo de digestión de 10 a 20 días, se obtenía una remoción de materia orgánica mayor del 60%. Sin embargo, a temperaturas menores, los porcentajes de remoción máximos alcanzados eran menores que 60% y el tiempo de digestión necesario era mayor. Lo anterior se atribuye a una baja en la rapidez de la hidrólisis.

La información generada de este y otros trabajos muestra la alta sensibilidad del tratamiento anaerobio respecto a la temperatura, pero también la posibilidad de aplicar la digestión anaerobia en regiones donde el sistema pueda tener una temperatura superior a los 20°C, que es el menor límite práctico para la descomposición de los lípidos y, por lo tanto, la mínima temperatura a la que debe funcionar un digestor anaerobio de lodos.

La digestión anaerobia de los lodos ocurre usualmente en el rango mesofílico (35 °C). La operación en el rango termofílico (55 °C) es posible, pero es aun poco común.

Es importante que la temperatura permanezca constante. Cada tipo de bacteria formadora de metano tiene una temperatura óptima para su crecimiento. Por ejemplo, la temperatura mesofílica es óptima para un número importante de microorganismos; sin embargo, para otro grupo de microorganismos lo es el rango termofílico. Si la temperatura fluctúa, no existe un grupo de bacterias formadoras de metano que pueda mantener una alta población estable. Una disminución en los niveles de población de microorganismos significa reducir el grado de estabilización de lodos y por ende la formación de metano.

6.4.3. Nutrientes.

Los principales nutrientes requeridos por la digestión anaerobia son el nitrógeno y el fósforo. Estos elementos constituyen parte importante de las células de los microorganismos responsables de la estabilización. Los requerimientos de nutrientes son directamente proporcionales a la masa de microorganismos en crecimiento. En promedio, las células contienen aproximadamente un 12.5% de nitrógeno y un 2% de fósforo. Los requerimientos de nitrógeno para la estabilización de lodos es aproximadamente del 11% y del 2% de fósforo para microorganismos en crecimiento.

Los iones de sodio, potasio, calcio, magnesio, hierro y azufre son también requeridos para una adecuada digestión. Por otro lado, los microorganismos metanogénicos requieren de trazas de cobre, zinc, cobalto, níquel y molibdeno para presentar un crecimiento celular. Estos metales forman precipitados de baja solubilidad y participan en complejas reacciones químicas.

La digestión anaerobia tiene una baja tasa de crecimiento de microorganismos y, por lo tanto, menores requerimientos nutricionales. Los lodos municipales usualmente contienen nitrógeno y fósforo en cantidades suficientes para la digestión. Lo mismo puede decirse en lo que respecta a los metales y otros nutrientes. La adición de químicos es por lo tanto normalmente innecesaria en esta aplicación de la digestión anaerobia.

6.4.4. Toxicidad.

El proceso de tratamiento anaerobio de lodos es sensible a ciertos compuestos como: sulfuros, metales pesados, altas concentraciones de calcio, sodio y potasio, la presencia de oxígeno disuelto, amoníaco y compuestos orgánicos clorados. La concentración inhibitoria de una sustancia depende de numerosas variables, incluyendo el pH, carga orgánica, temperatura, carga hidráulica y el nivel de concentración de la sustancia tóxica con respecto a la concentración de la biomasa.

Además de los efectos inhibitorios que la acumulación de ciertos productos intermedios de la digestión anaerobia, como los ácidos grasos volátiles, pueda tener sobre la metanogénesis, existen otros compuestos que también inhiben o son tóxicos a la población microbiana anaerobia. Entre estos compuestos y elementos se encuentran:

- Ácido sulfhídrico (H_2S).
- Amoníaco (NH_3).
- Metales pesados (Ni, Hg, Pb, Cr, Zn).
- Cianuro (CN).
- Compuestos recalcitrantes (compuestos orgánicos clorados, formaldehído).

En la **TABLA 6.2.** se presenta mayor información sobre estas sustancias.

Los principales efectos de la presencia de elementos tóxicos son el antagonismo y el sinergismo, ambos causas de la inhibición del proceso. El antagonismo es la reducción del efecto inhibitorio de una sustancia en presencia de otra. Por el contrario, el sinergismo es el incremento del efecto inhibitorio de una sustancia por la presencia de otra.

En la **TABLA 6.3.** y en la **TABLA 6.4.** se presentan valores a los que se presentan distintos grados de inhibición del proceso.

Los microorganismos deben estar libres de componentes tóxicos para realizar una adecuada digestión. Los elementos tóxicos e inhibidores más comunes son: compuestos orgánicos, metales pesados, amoníaco, sulfuros y sales.

TABLA 6.2. SUSTANCIAS TÓXICAS O INHIBITORIAS DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA.

SUSTANCIA	CARACTERÍSTICA INHIBITORIA
Acumulación de ácidos grasos volátiles.	Efecto inhibitorio general debido al bajo pH establecido por el agotamiento del sistema amortiguador preexistente y al posible aumento de la concentración de especies no ionizadas que actúan directamente sobre las células bacterianas.
Ácido sulfhídrico y amoníaco.	En altas concentraciones pueden formar sistemas amortiguadores de ácido débil respectivamente, e inhibir la metanogénesis. El papel del pH es fundamental. Se ha observado toxicidad del H ₂ S en concentraciones de 200 a 1,500 mg/L (Stronach, 1986). Concentraciones inhibitorias de NH ₃ : 3,000-4,000 mg/L (pH=7.1, para <i>Methanobacterium formicium</i>), 6,000 mg/L (pH=8, para bacterias no metanógenas). Las bacterias metanógenas tienen capacidad de aclimatación a altas concentraciones de estos compuestos.
Metales pesados y cianuro.	Los metales pesados, principalmente en su forma iónica, afectan el potencial de óxido-reducción del sistema, el pH y la concentración iónica. Además, pueden desactivar enzimas. Orden creciente de toxicidad de algunos metales: Ni>Pb>Cr>Zn Se ha observado capacidad de aclimatación de bacterias anaerobias a cargas repetidas de metales pesados (Hayes y Theis, 1978).
Compuestos recalcitrantes.	Difíciles de degradar y pueden causar toxicidad o inhibición (cloruros de bifenilo, CCl ₄ , CH ₃ Cl, formaldehído).

(Van Haandel y Lettinga, 1994)

Las referencias de la tabla se encuentran en la misma fuente.

Algunas medidas útiles a tomar, para atenuar los efectos de compuestos tóxicos y así poder dar el tratamiento a los lodos, son:

- Permitir la adaptación de la biomasa.
- Diluir el efluente con el influente hasta que el nivel de toxicidad sea tolerable o biodegradable.

Para minimizar los efectos de una toxicidad transitoria es recomendable utilizar procesos con altos tiempos de retención de biomasa, y para minimizar los efectos de una toxicidad crónica o permanente es necesario utilizar procesos con recirculación para diluir el efluente y maximizar la aclimatación de las bacterias.

TABLA 6.3. CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS INORGÁNICOS QUE SE REPORTAN COMO INHIBITORIOS PARA LOS MICROORGANISMOS ENCARGADOS DEL TRATAMIENTO ANAEROBIO.

SUSTANCIA	CONCENTRACIÓN (mg/L) A LA CUAL EL ELEMENTO ES:	
	MODERADAMENTE INHIBITORIO	ALTAMENTE INHIBITORIO
Sodio	3,500 - 5,500	8,000
Potasio	2,500 - 4,500	12,000
Calcio	2,500 - 4,500	8,000
Magnesio	1,000 - 1,500	3,000
Amoniaco	1,500 - 3,000	3,000
Sulfuro	200	200
Cobre		0.5 soluble 50 - 70 total
Cromo (VI)		3.0 soluble 200 - 600 total
Cromo (III)		180 - 420
Níquel		2.0 soluble 30 total
Zinc		1.0 soluble

Hall, 1992.

TABLA 6.4. ALGUNOS COMPUESTOS Y SUSTANCIAS ORGÁNICAS INHIBITORIOS DE LAS BACTERIAS METANÓGENAS.

SUSTANCIA	CONCENTRACIÓN CON EFECTO DE UN 50% DE INHIBICIÓN (mg/L)
Acetaldehído	440
Acroleína (aldehído vinílico)	10
Bacitracina (antibiótico)	20
Cloroformo	15
Creolina (mezcla de compuestos fenólicos, creosotas y resinas)	1
Hidrocarburos fluorados (CCl ₃ F, CCl ₂ F ₂)	1
Formaldehído	70
Ácidos grasos de cadena larga	500

Hall, 1992.

6.5. PARÁMETROS DE DISEÑO DE DIGESTORES DE LODOS.

Idealmente, el diseño de digestores anaerobios de lodos se debe basar en los principios microbiológicos que rigen cada una de las etapas de la digestión descritas anteriormente. Hoy en día, existen varios métodos cuyo objetivo es definir el tamaño del digestor, los cuales se fundamentan en conceptos como el tiempo de retención celular, factores de carga volumétrica y con base en la producción de lodo de acuerdo a la población servida.

6.5.1. Tiempo de Retención Celular (θ_c).

Se define con este nombre (θ_c) al tiempo que los lodos estarán retenidos en el digestor de acuerdo a la temperatura de operación del mismo, como se observa en la **TABLA 6.5.**

TABLA 6.5. TIEMPO DE RETENCIÓN CELULAR SUGERIDO PARA EL DISEÑO DE DIGESTORES ANAEROBIOS.

TEMPERATURA DE OPERACIÓN (°C)	θ_c mínimo (días)	θ_c recomendado (días)
18	11	28
24	8	20
30	6	14
35	4	10
40	4	10

Metcalf and Eddy, 1991.

De acuerdo al valor de θ_c será la cantidad de masa biológica sintetizada diariamente en el digestor, conforme a la siguiente ecuación:

$$Px = \frac{Y[S_0 - S]}{1 + Kd\theta_c}$$

donde:

- So = carga de DBO del influente (kg/d)
- S = carga de DBO del efluente (kg/d)
- θ_c = tiempo de retención celular (d)
- Y = coeficiente (mg/mg)
- kd = coeficiente endógeno (d^{-1})

Los coeficientes Y y Kd se denominan coeficientes cinéticos, cuyos valores se establecen de acuerdo a la **TABLA 6.6.**

TABLA 6.6. COEFICIENTES CINÉTICOS PARA LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE VARIOS SUSTRATOS.

SUSTRATO	COEFICIENTE	RANGO	VALOR TÍPICO
Lodo doméstico	Y (kg SSV/ mg DBO ₅)	0.040 - 0.100	0.060
	Kd (d^{-1})	0.020 - 0.040	0.030
Grasas	Y (kg SSV/ mg DBO ₅)	0.040 - 0.070	0.050
	Kd (d^{-1})	0.030 - 0.050	0.040
Carbohidratos	Y (kg SSV/ mg DBO ₅)	0.020 - 0.040	0.024
	Kd (d^{-1})	0.025 - 0.035	0.030
Proteínas	Y (kg SSV/ mg DBO ₅)	0.050 - 0.090	0.075
	Kd (d^{-1})	0.010 - 0.020	0.014

Metcalf and Eddy, 1991.

La degradación de esta masa biológica y de la materia orgánica contenida en los lodos producirá la generación de metano (CH₄), cuya cantidad se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$V_{CH_4} = [(S_o - S) - 1.42 Px] 0.35$$

donde:

- So = carga de DBO del influente (kg/d)
- S = carga de DBO del efluente (kg/d)
- Px = masa biológica sintetizada (kg/d)
- 0.35=factor de conversión (m³/kg)

6.5.2. Factores de Carga Volumétrica.

Uno de los métodos más comunes utilizados en el dimensionamiento de digestores es la determinación del volumen requerido con base en la carga volumétrica, la cual puede darse de dos maneras: la primera, como relación de la cantidad de SSV añadidos por día por m³ de la capacidad del digestor; y la segunda, como la relación de la cantidad de SSV añadidos por día por kg de SSV en el digestor.

Un tanque de digestión anaerobia de baja tasa se encuentra dividido en tres estratos: el supernadante, en la parte superior; la zona de digestión activa, en la parte media y la zona de lodo digerido, en la parte inferior. Estas necesidades de volumen para el lodo digerido, para el supernadante y para las fluctuaciones diarias en la carga de lodo son casi constantes, por lo que el rango de la carga volumétrica en digestores de baja tasa es pequeño.

Para digestores con tiempo de retención de 10 a 20 días o de alta tasa, la carga volumétrica varía entre 1.6 kg/m³ a 4.8 kg/m³*d. El efecto de la concentración de sólidos en el lodo y el tiempo de retención, sobre el factor de carga volumétrica, se puede observar en la TABLA 6.7.

TABLA 6.7. EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS EN EL LODO Y DEL TIEMPO DE RETENCIÓN SOBRE EL FACTOR DE CARGA VOLUMÉTRICA

CONCENTRACIÓN EN EL LODO (%)	FACTOR DE CARGA VOLUMÉTRICA (kg/m ³)			
	10d	12d	15d	20d
4	3.05	2.57	2.08	1.60
5	3.88	3.21	2.57	1.92
6	4.49	3.88	3.05	2.24
7	5.29	4.49	3.53	2.73
8	6.09	5.13	4.01	3.05
9	6.89	5.77	4.65	3.37
10	7.70	6.41	5.13	3.85

(Metcalf and Eddy, 1991).

6.5.3. Población Servida.

Los tanques de digestión anaerobia pueden ser diseñados volumétricamente asignando determinado número de m³ por habitante servido, más un volumen que contenga las variaciones en la carga de lodo.

Los criterios típicos para el diseño de digestores anaerobios se muestran en la **TABLA 6.8**. Estos valores pueden usarse cuando el volumen de lodo por digerir es desconocido. Para digestores que no cuenten con sistema de calentamiento, la capacidad debe aumentarse, considerando las condiciones climáticas particulares y el volumen adicional para cubrir las variaciones en la carga de lodo.

TABLA 6.8. CRITERIOS DE DISEÑO TÍPICOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE DIGESTORES ANAEROBIOS MESOFÍLICOS.

PARÁMETRO	DIGESTIÓN BAJA TASA	DIGESTIÓN DE ALTA TASA
Volumen (m ³ /hab)		
• Lodo Primario	0.06 - 0.08	0.04 - 0.06
• Lodo Primario + Lodo Espesado	0.07 - 0.14	0.074 - 0.0935
• Lodo Primario + Lodo Activado	0.07 - 0.17	0.074 - 0.07
Carga de Sólidos (kg/m ³ *d)	0.64 - 1.60	1.60 - 3.20
Tiempo de retención (d)	30 - 60	15 - 20

(Metcalf and Eddy, 1991).

6.6. TIPOS DE REACTORES ANAEROBIOS PARA EL TRATAMIENTO DE LODOS.

El desarrollo de nuevos reactores anaerobios ha sido condicionado grandemente por el avance en el conocimiento del proceso de digestión anaerobia.

Existen muchos tipos de sistemas anaerobios. Las características que diferencian a cada uno de estos reactores se relacionan con la retención de los microorganismos encargados de la digestión y, por tanto, con los tiempos de retención hidráulica y celular de los procesos, y con el contacto que se establece entre la biomasa y su sustrato.

6.6.1. Digestión Anaerobia Convencional o de Baja Tasa.

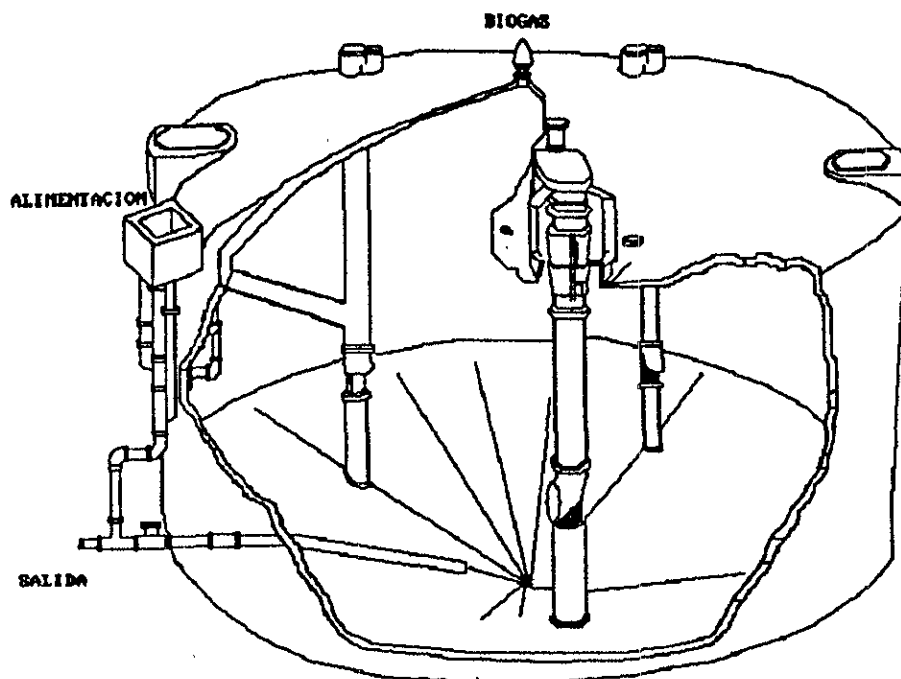
Este tipo de digestión se lleva a cabo generalmente en un proceso de una etapa. Las funciones de digestión, espesamiento de lodos y formación de las natas son realizados simultáneamente. En la **FIGURA 6.2**, se muestran sus principales características. Operacionalmente, el lodo sin tratar es introducido en la zona donde el lodo está en el proceso de digestión. El lodo debe ser preferentemente calentado por un intercambiador de calor externo. Cuando el gas alcanza la superficie, lleva consigo partículas de lodo y otros materiales, como grasas y aceites, dando origen a la formación de la capa de natas.

Como resultado de la digestión, el lodo se estratifica y se mineraliza, incrementando su porcentaje de sólidos. Debido a la estratificación y a la carencia de mezclado, no más del 50% del volumen del digestor es usado. A consecuencia de estas limitaciones, la digestión anaerobia convencional es usada principalmente para pequeñas instalaciones.

6.6.2. Digestión Anaerobia de Alta Tasa.

Este proceso difiere de la digestión anaerobia convencional en la concentración mayor de la carga de sólidos. El lodo es mezclado ya sea por recirculación de gas, mezcladores mecánicos o bombeo, además de ser calentado para alcanzar rangos de digestión óptima (entre 30° y 37°C). El equipo de mezclado debe tener gran capacidad y debe alcanzar la parte baja del tanque; las tuberías de gas deben ser amplias; las tuberías de eliminación conducirán lodo y supernadante, además el tanque debe tener profundidad suficiente para ayudar al mezclado. El biogás producido se emplea para calentar el contenido del digestor, habiendo normalmente un excedente.

FIGURA 6.2. TÍPICO TANQUE DIGESTOR STANDARD



El lodo debe ser bombeado al digestor continuamente o por ciclos de bombeo que pueden fluctuar entre 30 min. a 2 hrs. para mantener constante las condiciones en el reactor. El lodo sin tratar desplaza al lodo digerido hacia una trampa o pozo. Los tanques de digestión deben tener techos compuestos o cubiertas flotantes, que permitan una capacidad extra en caso de posibles excesos de gas. Alternativamente, el gas puede ser almacenado en contenedores o comprimidos y almacenados bajo presión.

Normalmente, los digestores de alta tasa están acoplados en serie con un segundo tanque de digestión. En este arreglo, el primer tanque es usado para digestión y es acondicionado con equipo de calentamiento y mezclado. El segundo tanque es usado para el almacenamiento, concentración del lodo digerido y para la formación de supernadante relativamente limpio. Generalmente, los tanques son contruidos iguales, en cuyo caso cualquiera de los dos puede ser el tanque primario. En otros casos, el segundo tanque puede ser abierto o una laguna de lodos. Los tanques deben tener cubiertas flotantes para capturar los excesos de gas que pudieran producirse.

6.6.3. Digestión Anaerobia de Lodos Separados.

La mayoría de las plantas de tratamiento de agua residual emplean digestión anaerobia usando tanques comunes para la digestión de una mezcla de lodos primarios y biológicos. Los diseños recientes han separado la digestión de estos lodos, en algunos casos el lodo biológico es digerido aeróbicamente. Las razones que se citan para la separación de la digestión son:

- Las características físico-químicas de los lodos primarios digeridos se mantienen.
- El proceso de digestión se diseña específicamente para el lodo a ser tratado.
- Las condiciones óptimas del proceso son más fáciles de mantener.

Los criterios de diseño y datos de resultados para la digestión anaeróbica separada son muy limitados.

6.7. PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS PRODUCIDOS POR EL TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO Y LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LODOS..

De acuerdo con la TABLA 6.9, la cantidad de sólidos contenidos en el lodo crudo lo caracterizan como un lodo primario no tratado, ya que los valores obtenidos caen dentro del rango de 2 a 8% sólidos totales secos (%ST) debido a la adición de la cal, los resultados de los sólidos volátiles se encuentran fuera del rango de los lodos primarios, encontrándose en el rango de 30 a 60 que corresponde a un lodo primario digerido. El Nitrógeno y el Fósforo también caracterizan al lodo como primario no tratado.

TABLA 6.9. CARACTERIZACIÓN TÍPICA DE LOS LODOS.

PARÁMETRO	LODO PRIMARIO NO TRATADO	LODO PRIMARIO DIGERIDO	LODO DEL TPA+DIG	LODO ACTIVADO
	RANGO	RANGO	VALORES	VALORES
Sólidos totales secos (%)	2.0 - 8.0	6.0 - 12.0	18	0.83 - 1.16
Sólidos volátiles (%ST)	60 - 80	30 - 60	30	59 - 88
Nitrógeno (N, %ST)	1.5 - 4.0	1.6 - 6.0	-	2.4 - 5.0
Fósforo (PO ₄ , %ST)	0.8 - 2.8	1.5 - 4.0	-	2.8 - 11.0
pH	5.0 - 8.0	6.5 - 7.5	7.0	6.5 - 8.0

Metcalf and Eddy, 1991.

6.8. BALANCE DE MATERIA DEL TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO Y DIGESTION ANAEROBIA DE LOS LODOS.

El balance de materia es un procedimiento de cálculo que de acuerdo a las condiciones de eficiencia de remoción de sólidos, permite definir el volumen de lodo que será generado a lo largo del tren de tratamiento y servir de base para el diseño de las estructuras necesarias.

Los balances de materia que se presentan a continuación corresponden a:

- Tratamiento Primario Avanzado con digestión anaerobia de los lodos (44 m³/s).

TABLA 6.10. BASES DE DISEÑO DEL TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO CON DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LODOS.

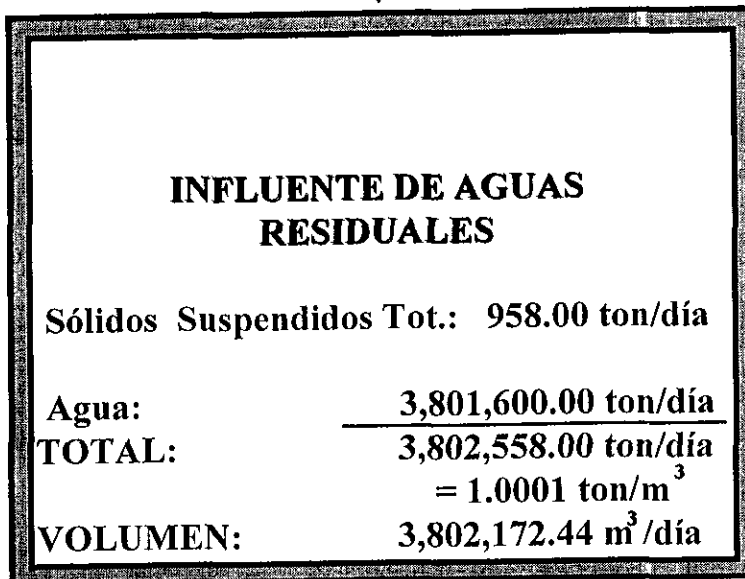
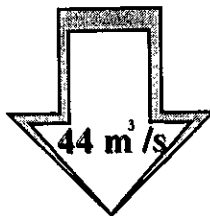
DATOS DE DISEÑO	VALOR
**Gasto	44 m ³ /s
**Volumen anual tratado	1,387.58 x 10 ⁶ m ³ /año
**SST influente	252 mg/l
**Dosis de coagulante (Sulfato de Aluminio) para el Tratamiento Primario Avanzado	50 mg/l
**Concentración de sólidos en el lodo primario	2 %
**Concentración de sólidos en lodo espesado	7 %
**Concentración de sólidos en lodo digerido	5.5 %
**Concentración de sólidos en lodo deshidratado	22 %
*Cálculo del peso específico de los sólidos	$\frac{1}{S_s} \approx \frac{\%SSV \times 100}{S_{ssv}} + \frac{\%SSF \times 100}{S_{ssf}}$
*Cálculo del peso específico del lodo	$\frac{1}{Sl} \approx \frac{\%SST \times 100}{S_{ss}} + \frac{\%Agua \times 100}{S_{agua}}$

S, Peso Especifico.

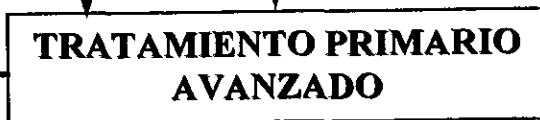
*Metcalf and Eddy, 1991.

**CNA, 1995.

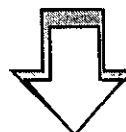
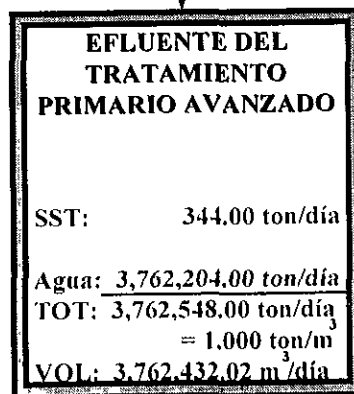
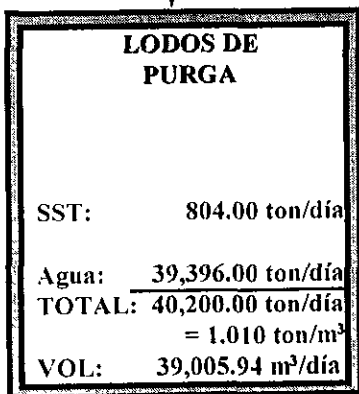
ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO (balance de materia)



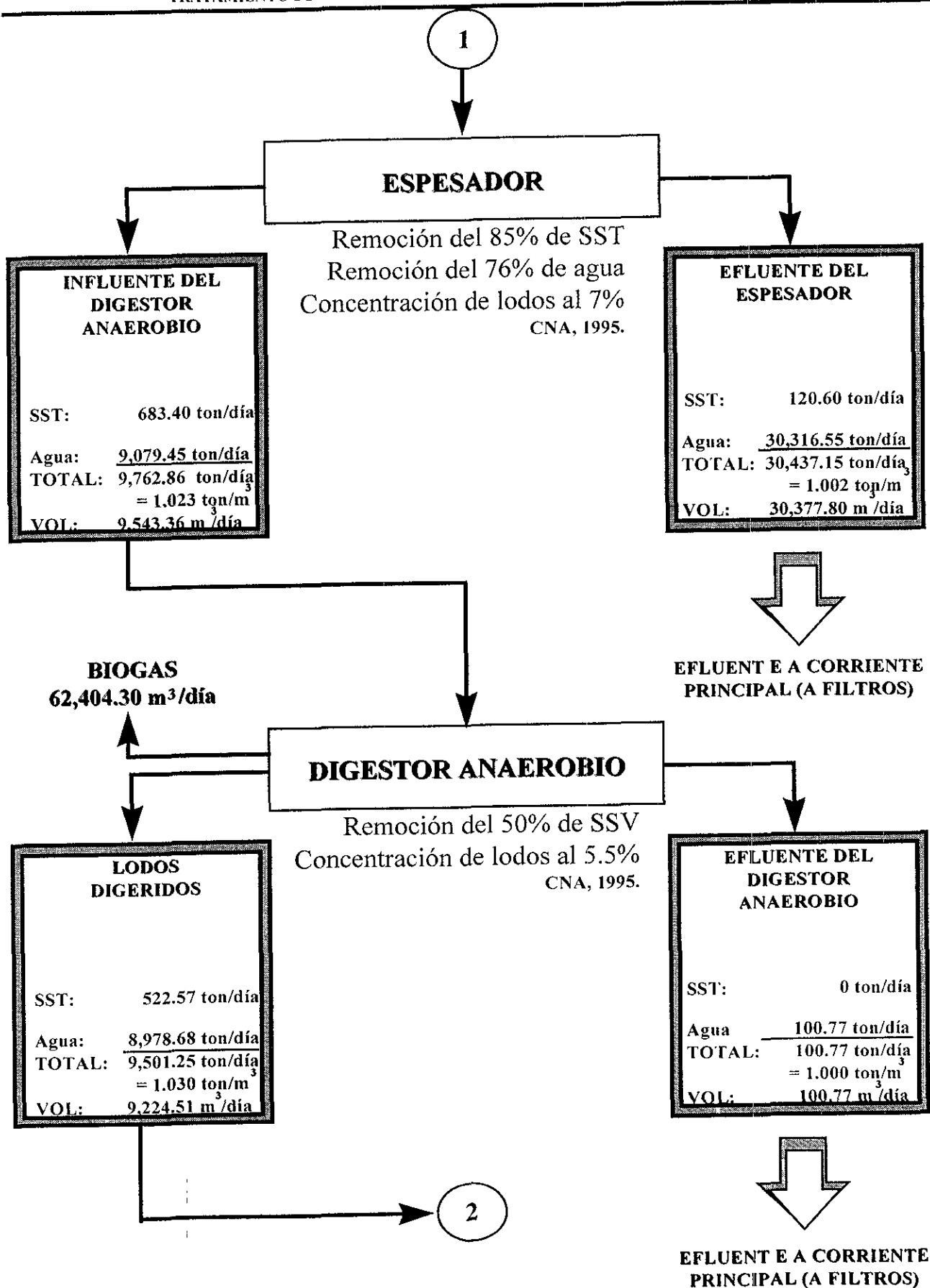
Coagulante
(Sulfato de Aluminio)
190 ton/d

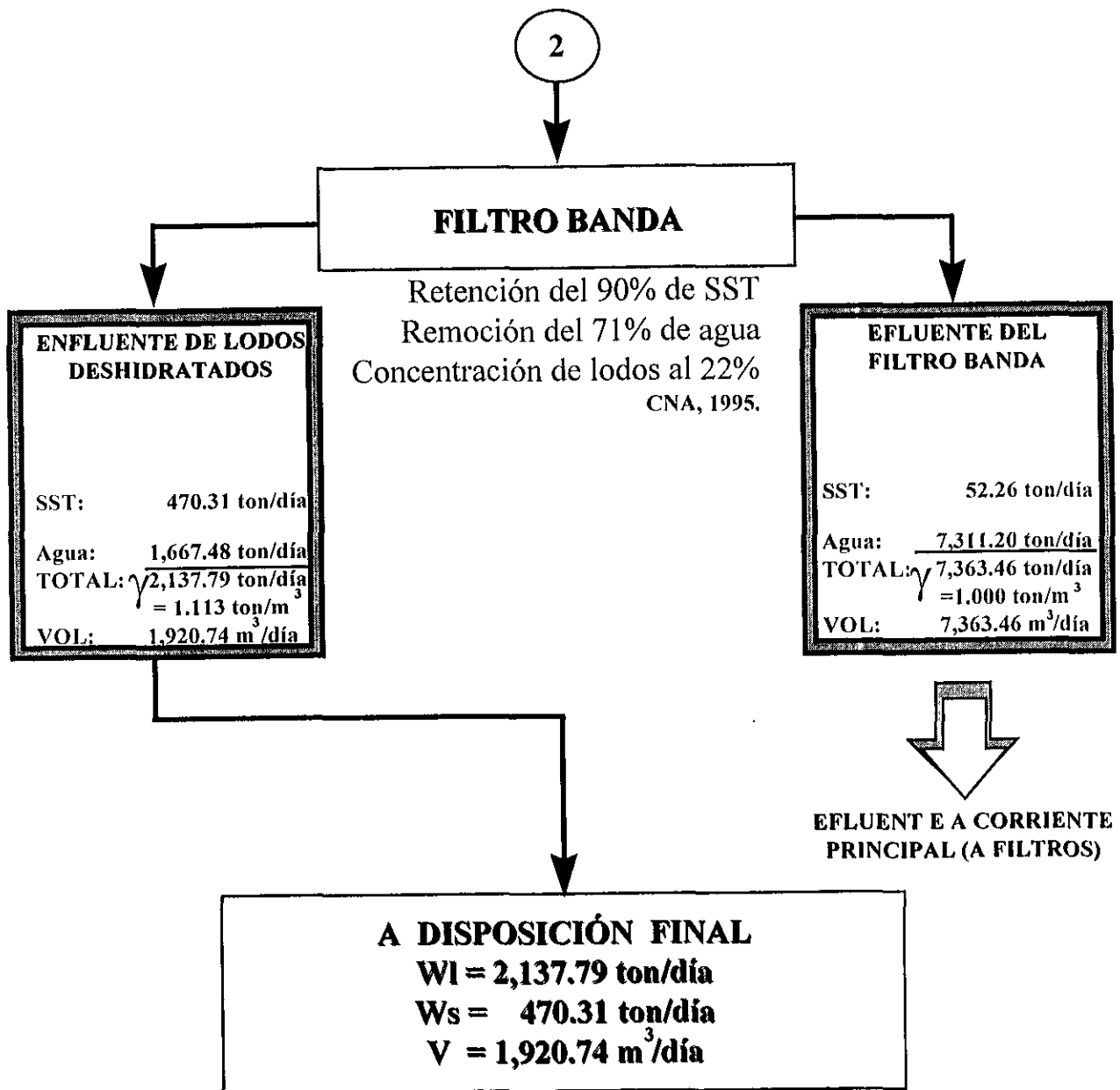


Remoción del 70% de sólidos
Concentración de lodos al 2%
CNA, 1995.



EFLUENTE A FILTROS Y A DESINFECCIÓN





CAPÍTULO 7

SITIOS DE DISPOSICIÓN

La disposición segura de los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua residual debe ser considerada como parte integral de su planeación y diseño. Las prácticas aceptadas para la disposición de lodos incluyen: procesos de conversión, como la incineración, y métodos de disposición directa en el terreno.

Las principales restricciones para la disposición de los lodos son la económico y la ambiental. Las opciones que pueden considerarse en forma general para solucionar adecuadamente este problema son:

- Rellenos sanitarios.
- Disposición en el terreno
 - a) para la agricultura.
 - b) de recuperación.
 - c) como mejoradores de suelos
- Disposición en el océano.
- Inyección en pozos profundos.
- Incineración.

7.1. RELLENOS SANITARIOS.

La planeación, diseño y operación de un relleno sanitario requiere de estudios detallados. En este método de disposición pueden presentarse erosión de suelos, ruido, malos olores y generación de gases durante la vida útil del relleno. En el caso de lodos, se usan para aquéllos provenientes del tratamiento de agua municipal (en Estados Unidos éstos no están clasificados como peligrosos).

En general, se requiere que sean previamente estabilizados y deshidratados. Los rellenos sanitarios deben tener arcilla o recubrimientos sintéticos (PVC, polietileno, etc.) para evitar infiltraciones de los lixiviados al subsuelo, lo que provocaría la contaminación de los mantos acuíferos. Como medida de seguridad se cuenta con pozos, que permiten el monitoreo del agua del subsuelo para confirmar que no exista contaminación y permitir el escape de gases potencialmente explosivos.

7.2. DISPOSICIÓN EN TERRENO.

La disposición directa de lodos sobre el terreno es una práctica que ha sido exitosa por décadas. El interés en el uso de este método de disposición se ha incrementado en los últimos años, como resultado de la consideración de factores económicos, poco favorables para otras alternativas de disposición final.

La aplicación directa en el terreno de lodos estabilizados se define como la colocación de lodo sobre el suelo o por debajo de él. El lodo puede ser aplicado en terrenos agrícolas, terrenos forestales y en terrenos de recuperación, los cuales se consideran como aquéllos cuyas características físico-químicas pueden ser modificadas para beneficio de la comunidad. En todos estos casos, la aplicación directa en el terreno es elegida con el objetivo de mejorar las condiciones del suelo y proveer un tratamiento más completo a los lodos estabilizados, al intervenir los microorganismos contenidos en el suelo, la luz solar y el aire, en la destrucción de los organismos patógenos que pudiera contener el lodo estabilizado

En varios casos, los lodos representan una fuente de fertilizantes y un mejorador útil de suelos y por ello una opción es utilizarlos en la agricultura.

Se considera que la tasa de aplicación de los lodos debe ser igual a la del consumo del nitrógeno por los cultivos con el objeto de evitar la contaminación del acuífero con nitratos. En ocasiones, es el contenido de metales (en especial el cadmio), lo que limita su aplicación.

7.2.1. Nitrógeno y Fósforo.

Los lodos contienen cantidades no despreciables de N y P, similares al abono vegetal, como se muestra en la TABLA 7.1.

TABLA 7.1. CONTENIDO DE N Y P EN DESECHOS.

DESECHO	N (kg/Ton)	P (kg/Ton)
Abono vegetal	30	10
Excreta humana	250	36
Lodos urbanos mezclados	40	20
Lodos urbanos (mediana en EUA)	33	23
Lodos urbanos (promedio en EUA)	39	25

(EPA, 1983)

El nitrógeno en los lodos se encuentra en forma orgánica, amoniacal u oxidada (nitritos y nitratos). Las tres últimas son asimilables por las plantas mientras que la orgánica debe ser primero convertida por los microorganismos del suelo a la forma inorgánica. En forma práctica, se considera que el 80% del nitrógeno de los lodos está disponible para las plantas.

La utilización del fósforo varía entre 40 y 80%.

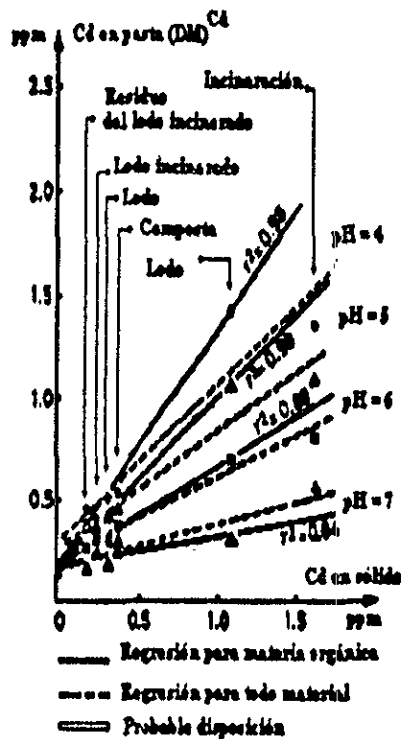
7.2.2. Potasio.

En general, hay poco potasio en los lodos, ya que es lixiviado y liberado junto con el efluente de la planta durante el proceso de tratamiento del agua.

7.2.3. Cadmio.

El cadmio es un material tóxico para las plantas al que no se le ha identificado ningún beneficio en el metabolismo humano. De acuerdo a algunos estudios (EPA, 1983), el contenido de cadmio en los suelos fluctúa entre 3 y 3,410 ppm, con un valor medio estadístico de 110 ppm. Se establece que la concentración mínima de Cd en los lodos es de 0.3 ppm que equivale a la que normalmente proviene de la excreta humana y bajo de la cual es prácticamente imposible descender. La absorción de Cd por las plantas es proporcional a su concentración en el suelo y dependen del pH en forma diferente para cada tipo de suelo, por lo que la normatividad debería tomar en cuenta estos aspectos (FIGURA 7.1.).

FIGURA 7.1. BALANCE DE CADMIO EN SÓLIDOS.



7.2.4. Patógenos.

Los patógenos se clasifican en:

- a) Bacterias.
- b) Parásitos.
- c) Virus.

En los lodos, las bacterias predominantes son las salmonellas y muchas de sus especies son patógenas. Su inactivación se produce en forma efectiva en el composteo y la pasteurización y, parcialmente en la digestión anaerobia y aerobia.

Una vez en el suelo, las bacterias son inactivadas en un grado y una tasa que es función de la temperatura del suelo (típicamente 20 semanas).

Los parásitos en los lodos incluyen huevecillos de lombrices, nemátodos y áscaris. Se supone que un embrión de éstos basta para producir la infección, por lo que su inactivación es necesaria antes de su ingestión. Como en el caso de las bacterias, la digestión controla el problema pero sólo en forma parcial, lo que se agrava al considerar que su sobrevivencia en el suelo es superior a la de las bacterias. Por ejemplo, para huevecillos de áscaris es de hasta 14 meses.

Existe muy poca información sobre la forma de transmisión y transformación a lo largo de los sistemas de tratamiento de los virus. Los que se han encontrado en los lodos son los de la poliomielitis y de la hepatitis.

7.2.5. Mejorador de Suelo.

Este uso consiste en la colocación de los lodos en el suelo con el único fin de que los microorganismos de éste asimilen los lodos. Se usa en lugares con suelos de bajo valor económico y donde no existen problemas de salud y afectación del medio ambiente. Casi siempre se colocan en forma directa sin deshidratación, que en caso de ser requerida limita la aplicación del proceso por el costo.

Cuando el lodo produce problemas de olor o la capacidad de asimilación del suelo es baja, se efectúa la disposición subsuperficial. Camiones con dispositivos para inyección, colocan al lodo 15 a 20 cm por debajo de la superficie, donde los microorganismos aerobios asimilan fácilmente la fracción orgánica.

Los métodos para la disposición de lodos en superficie y sub-superficial se muestran en la TABLA 7.2. y la de lodos deshidratados en la TABLA 7.3.

TABLA 7.2. MÉTODOS DE APLICACIÓN PARA LODOS DESHIDRATADOS Y EQUIPO.

MÉTODO	CARACTERÍSTICAS
• Esparcimiento	En camiones o tractores. El lodo es dispuesto sobre el suelo. La tasa de aplicación es controlada por la velocidad del camión; puede ser incorporado por arado y mezcla.
• Pilas o montones	Normalmente transportado por camión de volteo. La distribución y nivelación se efectúa por medio de un bulldozer. Se pueden incorporar por un cepillo ranurador con capas de 10.2 a 15.3 m.
• Resuspensión y manejo se menciona en la TABLA 41.	Se adapta para transportes en distancias largas (tren).

EPA, 1979.

7.3. DISPOSICIÓN EN POZOS.

Esta técnica es interesante cuando ya existen los pozos. Tiene también la ventaja de ser un sitio de disposición final, ya que los desechos en el futuro no tendrán contacto con el ser humano. Sin embargo, los riesgos son irreversibles y casi siempre relacionados con la alteración de la calidad de los acuíferos.

TABLA 7.3. MÉTODOS DE APLICACIÓN SUPERFICIAL Y SUBSUPERFICIAL Y EQUIPAMIENTO PARA LODOS LÍQUIDOS.

MÉTODO	CARACTERÍSTICAS	RECOMENDACIONES
APLICACIÓN SUPERFICIAL		
<ul style="list-style-type: none"> Aspersión (fija o portátil) 	<p>Se requieren orificios grandes para prevenir taponamiento; amplia selección de equipo comercial; el equipo debe ser limpiado si se emplean por más de 2 a 3 días.</p>	<p>Apto para suelos con pendientes; empleo continuo por largos períodos; puede haber problemas de olor y aerosoles.</p>
<ul style="list-style-type: none"> Esparcimiento sobre el terreno o inundación. 	<p>Se emplea para suelo con pendiente, con o sin vegetación, evitando escurrimientos, adecuado para operaciones de emergencia; difícil de efectuarlo por aspersión aérea; es más adecuado con tubos perforados o ranurados que requieren tamizado; los drenes deben ser limpiados si suspende la operación por más de 2 a 3 días.</p>	<p>Puede ser aplicado desde el camino en todo tipo de clima por medio de surcos.</p>
<ul style="list-style-type: none"> Surcos 	<p>Se requiere preparación previa del terreno; el consumo energético es menor que para la aspersión; se limita para lodos con bajo contenido de sólidos (de preferencia 3%).</p>	<p>Para suelos con pendiente entre 0.3 y 1% en función de la concentración de sólidos y el acondicionamiento del suelo. Tierra de relleno no se puede emplear cuando el suelo está húmedo o congelado.</p>
<ul style="list-style-type: none"> Camiones tanque 	<p>Capacidad de 1,900 a 14,400 l; los camiones grandes requieren llantas especiales, puede ser usado como método de irrigación temporal; con un sistema de bombeo se puede emplear para aspersar los lodos desde el camino.</p>	<p>Suelo agrícola; no se emplea en suelos blandos.</p>
APLICACIÓN SUBSUPERFICIAL		
<ul style="list-style-type: none"> Manguera flexible para irrigación (sistema de cordón umbilical) con inyección sub-superficial o descarga superficial. 	<p>Se requieren tubos o tanques presurizados para el suministro; se conecta una manguera de 200 m a un cabezal en forma de rastrillo o disco jalado por un vehículo; la abrasión puede provocar el rápido deterioro de la manguera; inyección sub-superficial por medio de surcos pequeños arados después de la distribución; descarga superficial antes del arado en los surcos. Tasa de aplicación de 113 a 225 ton húmedas/ha.</p>	<p>Suelo agrícola; no se use en suelos húmedos o congelados.</p>
<ul style="list-style-type: none"> Trailer de granja y tractor con descarga superficial 	<p>El lodo es descargado en el surco antes del arado; el lodo va en un tanque montado en un trailer; aplicación de 380 a 510 ton húmeda/ha. El lodo es esparcido en un banco angosto en la superficie del suelo e inmediatamente abajo del arado. Tasa de aplicación de 130 a 280 ton/ha.</p>	<p>Suelo agrícola; no se usa en suelos húmedos o congelados.</p>

7.4. DISPOSICIÓN EN EL OCÉANO.

Cuando los municipios colindan con el mar, la disposición de lodos aguas adentro es una alternativa. Actualmente, la EPA limita estrictamente la disposición en los océanos.

7.5. INCINERACIÓN.

La incineración se aplica en lodos deshidratados y consiste en la combustión completa de la materia orgánica contenida en los lodos. Se requiere una temperatura mínima de 700°C para evitar la emisión al ambiente de olores desagradables. Para la incineración de lodos es común el uso de hornos de cámaras múltiples dispuestas en forma vertical, en los cuales el lodo penetra por la parte superior, avanzando por cada una de las cámaras hacia la parte inferior.

CAPÍTULO 8

LEGISLACIÓN DE LA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA)

La Environmental Protection Agency (EPA) desarrolló a partir de 1987 una nueva regulación para proteger a la salud pública y al ambiente de cualquier efecto adverso de ciertos contaminantes que es probable que se encuentren en los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales. Esta regulación, The Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge (Título 40 del Code of Federal Regulations (CFR), parte 503), fue publicada el 19 de Febrero de 1993.

Este documento se refiere casi exclusivamente a los Biosólidos. Se denomina Biosólidos a los productos sólidos orgánicos producidos por los procedimientos de tratamiento de agua residual, que pueden ser reciclados y aprovechados. El término "lodo" tiende en estos casos a ser desechado, debido a que la opinión pública es sensible negativamente a este término.

La regulación 503 establece los requerimientos para el uso final o disposición de los lodos, cuando estos son:

- aplicados como acondicionador de suelos o fertilizante de semillas y vegetación.
- colocados en un sitio superficial de disposición final.
- cremados en un incinerador de biosólidos.

En el caso de los biosólidos que son dispuestos en tiraderos municipales, estos deben adherirse a las provisiones de la regulación 258 del mismo título 40.

La regulación 503 define a los biosólidos como residuos sólidos, semisólidos o líquidos generados durante el tratamiento de agua residual. Esta definición incluye la nata y sólidos removidos durante el tratamiento primario, secundario y terciario de aguas residuales y cualquier material derivado de los mismos biosólidos.

La regulación 503 incluye 5 subpartes:

- provisiones generales.
- disposición como mejorador de terrenos.
- disposición superficial.
- reducción de la atracción de vectores y patógenos.
- incineración.

Para cada uno de los usos regulados o prácticas de disposición, el texto incluye requerimientos generales, límites de contaminantes, manejo, estándares de operación y frecuencia de monitoreo e informes.

8.1. PROVISIONES GENERALES

Esta parte abarca las provisiones generales, como lo son los propósitos y la aplicación de la regulación, el período de aplicación y las exclusiones. Estas provisiones se aplican a cada uno de los usos del biosólido y a las distintas prácticas de disposición.

8.2. REQUERIMIENTOS PARA LA DISPOSICIÓN DE LOS LODOS COMO MEJORADORES DE TERRENOS.

En esta parte se define al término "aplicar" como la colocación de los biosólidos en el terreno para aprovechar los nutrientes que contiene o sus propiedades acondicionadoras para suelo.

Estos requerimientos abarcan al material derivado de los biosólidos, es decir, aquellos biosólidos que han sufrido modificaciones en su composición a lo largo del proceso de tratamiento o que se ha mezclado con otros materiales diferentes a los contenidos por el agua residual.

Los requerimientos que presenta la regulación para la aplicación de los biosólidos como mejoradores de terrenos son:

- Biosólidos de calidad excepcional (Exceptional Quality (EQ)). Con este término se caracterizan los biosólidos con bajo contenido de contaminantes, los clasificados como clase A (ausencia virtual de patógenos) y además presentan un bajo contenido de componentes degradables que son factores que atraen vectores. Los biosólidos EQ son considerados como un producto sin regulación para su uso debido a sus características especiales. Puede ser manejado en bolsas u otro tipo de contenedores.
- Biosólidos con concentración de contaminantes (Pollutant Concentration (PC)). Esta categoría presenta la misma concentración de contaminantes que los biosólidos EQ, pero son clasificados como biosólidos de clase B por su contenido de patógenos y/o son sujetos a las prácticas de disposición "in situ" en lugar de las opciones de tratamiento para reducir la atracción de vectores. A diferencia de los biosólidos EQ, los biosólidos PC sólo pueden ser aplicados en bultos y a granel, están sujetos a los requerimientos generales y a las prácticas de manejo; sin embargo, no es necesario el seguimiento de la carga de contaminantes sobre el terreno de disposición debido a que los estudios de estimación de riesgos han mostrado que la vida de un sitio bajo parámetros conservadores puede ser de por lo menos 100 a 300 años.
- Promedio acumulativo de la carga de contaminantes (Cumulative Pollutant Loading Rate (CPLR)). Los biosólidos CPLR exceden típicamente por lo menos uno de los límites de la concentración de contaminantes para un biosólido EQ y PC. Deben ser aplicados al terreno en forma de bultos o a granel, además de estar sujetos a un continuo seguimiento de los parámetros de los contaminantes, los cuales no deben exceder los límites establecidos para este tipo de lodo.

- Promedio de la carga anual de contaminantes (Annual Pollutant Loading Rate (APLR)). Son clasificados como biosólidos APLR aquellos cuyo contenido de contaminantes exceden los límites establecidos para los biosólidos EQ. Este tipo de lodo debe cumplir con los requerimientos establecidos para su aplicación, además de incluir instrucciones para su manejo y uso.

La regulación hace una clasificación de los tipos de terrenos en los que se puede hacer la disposición final de los biosólidos, como sigue:

- Tierra agrícola y forestal, áreas que no son frecuentemente visitadas por el público.
- Parques públicos, campos de golf y jardines, áreas donde las personas están expuestas al contacto con los biosólidos.

Los biosólidos pueden ser aplicados al terreno en bultos (biosólidos manufacturados con otros productos) o por medio de bolsas y otros contenedores (biosólidos ofrecidos al mercado en forma íntegra a granel).

Los valores límite de contaminantes para la disposición de lodos como mejoradores de terrenos se muestran en la **TABLA 8.1**.

TABLA 8.1. LÍMITES DE CONTAMINANTES PARA LA DISPOSICIÓN DE LOS LODOS COMO MEJORADORES DE TERRENOS

CONTAMINANTE	CONCENTRACIÓN MÁXIMA PARA LOS BIOSÓLIDOS APLICADOS PARA EL MEJORAMIENTO DEL TERRENO (mg/kg)	CONCENTRACIÓN MÁXIMA PARA BIOSÓLIDOS EQ Y PC (mg/kg)	CONCENTRACIÓN MÁXIMA PARA BIOSÓLIDOS CPLR (mg/kg)	CONCENTRACIÓN MÁXIMA PARA BIOSÓLIDOS APLR (kg/ha*año)
Arsénico	75	41	41	2.0
Cadmio	85	39	39	1.9
Cobre	4,300	1,500	1,500	75
Mercurio	57	17	17	0.85
Níquel	420	420	420	21
Selenio	100	36	100	5.0
Zinc	7,500	2,800	2,800	140
Aplicado a:	Cualquier tipo de biosólido aplicado al terreno.	Biosólidos en bulto y en bolsa u otros contenedores.	Biosólidos en bulto.	Biosólidos en bulto.

Peso referido a los sólidos secos (EPA, 1995)

Las directrices para la disposición como mejorador de terreno de los biosólidos EQ, PC, CPLR y APLR son:

Biosólidos EQ.

La EPA no establece algún tipo de seguimiento especial para este tipo de biosólido.

Biosólidos PC y CPLR.

- No pueden ser aplicados en terrenos inundados, congelados o cubiertos de nieve; sitios públicos o en sitios que estén en contacto con acuíferos superficiales o subterráneos.
- No pueden ser dispuestos en terrenos que se encuentren a menos de 10 metros de algún acuífero superficial.
- Si son aplicados a terrenos agrícolas, bosques o en lugares públicos, estos biosólidos deben ser aplicados en una cantidad que proporcione una cantidad de nitrógeno igual o menor al promedio recomendado para la agronomía.
- No deben poner en peligro especies que habitan el sitio de disposición.

Biosólidos APLR.

- El recipiente debe presentar en un lugar visible la información del contenido.
- Se prohíbe la aplicación de este tipo de lodos como mejoradores de terrenos.

8.3. REQUERIMIENTOS PARA LA DISPOSICIÓN SUPERFICIAL DE LOS LODOS.

Se define como disposición superficial al acto de colocación de grandes cantidades de biosólidos en una parcela o extensión importante de terreno, sin pretender el uso del contenido orgánico del lodo para acondicionar el suelo o para fertilizar semillas o cultivos. La colocación de los biosólidos en tiraderos municipales o en rellenos sanitarios es considerado como disposición superficial.

El tratamiento y el almacenamiento de los lodos no es considerado como una disposición superficial. Se define como el tratamiento a la preparación de los biosólidos para su uso o disposición final. Se considera almacenamiento cuando los biosólidos son dispuestos superficialmente por menos de 2 años.

Ciertos materiales presentes en los biosólidos, la calidad de los cuales cambia durante el proceso de tratamiento o por el mezclado con otro tipo de materiales, están sujetos a los requerimientos de disposición superficial de la regulación 503 con una excepción. Si los biosólidos son mezclados con desperdicios no peligrosos, la mezcla y el terreno donde son dispuestos están sujetos a las regulaciones para los desechos sólidos (regulación 258).

Las directrices para la disposición superficial de los biosólidos son:

- No se debe poner en riesgo a las especies que habitan el sitio de disposición.
- Los biosólidos no deben impedir el flujo natural del agua sobre el terreno.
- El sitio de disposición debe ser geológicamente estable.
- No se deben sembrar semillas (sólo se permite con la autorización correspondiente).
- No se debe utilizar el terreno para fines ganaderos (sólo se permite con la autorización correspondiente).
- Se debe restringir el acceso al público.
- Se debe asegurar que los biosólidos no contaminan el acuífero.

Los valores límite de contaminantes para la disposición superficial de los biosólidos se muestran en la **TABLA 8.2.**

TABLA 8.2. LÍMITES DE CONTAMINANTES PARA LA DISPOSICIÓN SUPERFICIAL DE LOS LODOS.

DISTANCIA DEL SITIO DE DISPOSICIÓN A LA BARDA PERIMETRAL (m)	CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES		
	ARSÉNICO (mg/kg)	CROMO (mg/kg)	NIQUEL (mg/kg)
0 - 25	30	200	210
25 - 50	34	220	240
50 - 75	39	260	270
75 - 100	46	300	320
100 - 125	53	360	390
125 - 150	62	450	420
mayor a 150	73	600	420

Peso referido a los sólidos secos (EPA, 1995)

8.4. REQUERIMIENTOS PARA LA REDUCCIÓN DE LA ATRACCIÓN DE PATÓGENOS Y VECTORES.

En esta sección de la regulación 503 se cubren los requerimientos para el control de los organismos causantes de enfermedades, denominados organismos patógenos, presentes en los biosólidos y para la reducción de la atracción de vectores, como moscas, mosquitos y otros organismos potencialmente causantes de enfermedades.

Además incluye las alternativas para la reducción de los niveles de patógenos contenidos en los biosólidos para ser dispuestos de manera segura. Se presentan criterios para la clasificación de los biosólidos como clase A o B, basado en el contenido de patógenos.

Si la concentración de organismos patógenos (*Salmonella sp.*, virus y huevos de helminto) se encuentra por debajo de niveles detectables, los biosólidos son clasificados como de clase "A". Los biosólidos son clasificados como clase "B" si los patógenos son detectados pero su concentración se ha reducido a un grado tal que no representan un impacto para el ambiente ni riesgo para la salud humana. Cuando los biosólidos de clase "B" son aplicados como mejoradores de terrenos, existen ciertas restricciones para su aplicación referentes principalmente a la reducción de los niveles de concentración de organismos patógenos.

Los métodos recomendados para el tratamiento de biosólidos de clase "A" para cumplir con los requerimientos de reducción de organismos patógenos son:

- Tratamiento Térmico.
- Tratamiento con alto pH y alta temperatura.
- Composta.
- Pasteurización.

Los métodos recomendados para el tratamiento de biosólidos de clase "B" para cumplir con los requerimientos de reducción de organismos patógenos son:

- Monitoreo de los indicadores de la concentración de organismos patógenos.
- Digestión anaerobia.
- Digestión aerobia.
- Composta.
- Estabilización con cal.

Los requerimientos para la reducción de patógenos y la atracción de vectores para sitios de disposición superficial de los biosólidos son:

Requerimientos para la reducción de organismos patógenos.

- Cubrir la unidad donde se encuentran los biosólidos activos.
- Aplicar uno de los métodos recomendados para el tratamiento de biosólidos de clase "A".
- Aplicar uno de los métodos recomendados para el tratamiento de biosólidos de clase "B".

Requerimiento para la reducción de la atracción de vectores.

- Cubrir la unidad donde se encuentran los biosólidos activos.
- Reducir el contenido de sólidos volátiles a 38% como mínimo.
- Tratar los biosólidos a través de un proceso aeróbico.
- Elevar el pH de los biosólidos.
- Inyectar o incorporar los biosólidos al suelo.

8.5. REQUERIMIENTOS PARA LA INCINERACIÓN DE BIOSÓLIDOS.

En esta sección se establecen los requerimientos para la cremación de los biosólidos con combustibles auxiliares, los cuales incluyen el gas, carbón, petróleo o algún otro material que sirva como fuente de energía.

La incineración de los biosólidos junto con otros desechos no es contemplada por la regulación 503. Debe hacerse notar que los desperdicios mezclados como un combustible auxiliar o mezclados e incinerados con biosólidos son considerados como combustible auxiliar cuando el peso seco es menor o igual al 30% del peso de la mezcla de biosólidos y el combustible principal.

La modificación a la regulación 503 realizada el 25 de Febrero de 1994 establece la obligatoriedad de un monitoreo continuo de las emisiones de monóxido de carbono y de hidrocarburos totales provenientes del incinerador.

Los sistemas de incineración generalmente consisten de un incinerador y uno o más equipos de control de la contaminación del aire, los cuales remueven partículas microscópicas.

Los límites del contenido de contaminantes que deben tener los biosólidos a incinerar son los mismos que se presentan en las tablas anteriores.

CAPÍTULO 9

ANÁLISIS TÉCNICO

La Zona Metropolitana de la ciudad de México cuenta con un sistema de drenaje mixto, es decir, que conduce los caudales de aguas residuales domésticos, industriales y los gastos extraordinarios producidos en época de lluvias. El volumen total escurrido en el drenaje es de 1,700 millones de m³/año, de los cuales:

- a) 1,350 millones de m³/año corresponden a los desechos urbanos.
- b) 450 millones de m³/año provienen del agua de lluvia.

Actualmente los escurrimientos superficiales naturales y las aguas residuales que se generan en la ZMCM se descargan de manera artificial hacia el río Tula, en la cuenca del río Pánuco. La descarga artificial se originó con la urbanización paulatina de las zonas lacustres en la época colonial, dando como resultado el sistema de drenaje urbano, constituido por:

- a) el Tajo de Nochistongo, construido en el siglo XVII.
- b) el Gran Canal del desagüe que se construyó a principios del siglo XX.
- c) el Emisor Poniente, construido en los años 60.
- d) el Emisor Central o Drenaje Profundo, construido en la década de los setenta.

El río Tula conduce las aguas residuales por el distrito de riego 3, localizado en el Estado de Hidalgo, donde son aprovechadas para riego de cultivos en la zonas de Chiconautla y Zumpango dentro del Valle, y la mayor parte, en la zona de Tula. En total se riegan 90,000 hectáreas. El agua excedente del riego escurre a la presa Endhó, sobre el río Tula.

El uso de las aguas residuales crudas generadas en la ZMCM con fines de riego ha provocado una serie de problemas ambientales y sanitarios, como son: la proliferación del lirio acuático en el embalse de la presa Endhó, que ha provocado la presencia de plagas de mosquitos; contaminación del acuífero por la infiltración de más del 90% del agua de riego, lo que ha elevado los valores de diversos componentes (N, Mg, Coliformes fecales, etc.) por encima de los admitidos para considerarse agua potable; el alto grado de enfermedades gastrointestinales, parasitarias y dermatológicas como resultado del riego directo con aguas crudas; la diseminación de estas enfermedades, fundamentalmente hacia la ZMCM, debido al flujo de personas y de productos agropecuarios; problemas de salud animal, pues la ganadería de la zona utiliza los canales de riego de aguas negras como abrevadero.

En el marco de la normatividad existente y de acuerdo a los principios de salud pública, el Gobierno Federal, a través de la Comisión Nacional del Agua (CNA), ha elaborado el Proyecto de Saneamiento del Valle de México, que contempla la construcción de la infraestructura hidráulica y sanitaria para la solución de estos problemas.

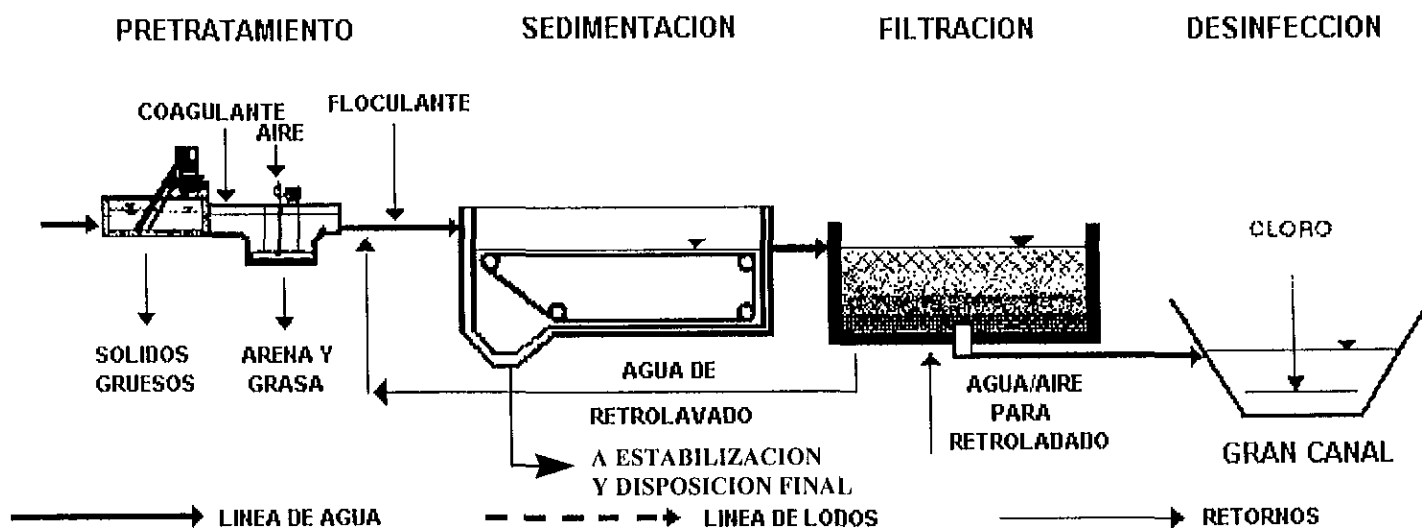
El proyecto se fundamenta en la necesidad de prevenir riesgos de inundación de la Ciudad de México y en el hecho de que las aguas negras que se producen en el área metropolitana se descargan sin tratamiento previo fuera del Valle de México, en donde son reutilizadas principalmente con fines hidroagrícolas.

9.1. TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO (TPA) Y ESTABILIZACIÓN DE LOS LODOS CON CAL.

La alternativa de tratamiento considerada por la CNA en el Proyecto de Saneamiento del Valle de México, denominado Tratamiento Primario Avanzado (TPA) y estabilización de los lodos con cal. Este planteamiento tiene como fundamento las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el cumplimiento a la Norma Oficial Mexicana, en relación al contenido de huevos de helminto (<1 huevo/litro) y adicionalmente menos de 1000 coliformes fecales/100 ml (promedio mensual), para proteger la salud de los trabajadores agrícolas en zonas de riego con aguas negras e irrigar cultivos sin restricciones.

El método de tratamiento de aguas residuales TPA, consiste en la adición de reactivos químicos coagulantes y floculantes (Sulfato de aluminio, dosis = 50 mg/l. CNA, 1995.) para incrementar la sedimentación de la materia orgánica e inorgánica que contienen las aguas generadas en la ZMCM. El tratamiento se completa con la filtración y cloración del agua tratada mediante el TPA, antes de su descarga hacia el Gran Canal, dren original de las aguas residuales (FIGURA 9.1.).

FIGURA 9.1. TREN DE TRATAMIENTO PROPUESTO PARA LAS AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN LA ZMCM.



El tratamiento de las aguas residuales presenta como producto final un agua con características físicas, químicas y biológicas que cumplen con la normatividad vigente, así como subproductos del tratamiento que reciben el nombre de "lodos", cuya cantidad depende directamente del tipo de tratamiento de agua residual seleccionado y, por su condición de concentración de contaminantes y materia orgánica, deben recibir un tratamiento particular de acuerdo a las características del sitio de disposición final elegido.

Según estudios de caudales realizados por la CNA, se tiene contemplado que la Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte" trate 44 m³/s. Debido a la magnitud del volumen de tratamiento, la CNA eligió como sitio de construcción y disposición de lodos los terrenos localizados en "El Caracol", Estado de México.

9.2. CONDICIONES EDAFOLÓGICAS DEL LAGO DE TEXCOCO.

9.2.1. Características Geotécnicas-Geohidrológicas.

Las características geotécnicas-geohidrológicas del ex-Lago de Texcoco (centro de la Cuenca del Valle de México), presentan el siguiente perfil típico del suelo:

a) Costra Superficial. Se tiene superficialmente una costra delgada de tequesquite (arcilla limosa) con espesores que varían de 2 a 10 cm, con alto contenido salino y elevado pH (superior a 10); enseguida se tiene una capa edáfica de color rojizo por efectos de oxidación aeróbica (0 - 50 cm) y capas de 50 - 100 cm de un color negro por efectos anaeróbicos de hidromorfismo debido al mal drenaje. En general, se trata de suelos muy consolidados por el efecto de secado, con abundantes grietas infiltradas por materiales eólicos. El nivel freático de la capa fluctúa entre 0.5 y 2.1 m de profundidad. Como consecuencia de las características físico-químicas del suelo, la vegetación se limita a la existencia de pasto salado.

b) Formación Arcillosa Superior. A nivel geotécnico, la zona lacustre del ex-Lago de Texcoco se encuentra dentro de la denominada Zona de Lago Virgen caracterizada por tener grandes espesores de arcillas altamente compresibles, con contenidos de agua entre 300 y 500% y altas relaciones de vacíos que varían entre 10 y 15 (**FIGURA 9.2.**). Debido a la sobre explotación de los acuíferos de la Cuenca de México, la arcilla lacustre se consolida, llegando a observarse hundimientos que varían de acuerdo a la zona en estudio. En la zona del ex-Lago de Texcoco se tienen hundimientos regionales del orden de 20 a 30 cm/año por efecto del bombeo del acuífero regional. El espesor de esta formación aumenta hacia el sur, con profundidades de 18.1 m en "El Caracol" y de 39.6 m en el Bordo de Xochiaca.

c) Capa Dura. Está integrada principalmente por materiales limoarenosos, ligeramente cementados y de resistencia variable. Su espesor varía entre 1.9 y 3.0 m.

d) Formación Arcillosa Inferior. Está compuesta por limos y arcillas compresibles. En promedio su espesor es de 15 m. Sus propiedades medias son de contenido de agua de 200% con una relación de vacío de 5.

e) Depósitos Profundos. Están conformados por materiales heterogéneos, principalmente arcillas, limos y arenas muy finas.

En la TABLA 9.1., se verifican algunas características de "El Caracol", probable sitio de disposición de los lodos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales "Texcoco Norte".

TABLA 9.1. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS - GEOHIDROLÓGICAS DEL EX-LAGO DE TEXCOCO.

CAPA	PARAMETRO	VALOR
Formación Arcillosa Superior	<ul style="list-style-type: none"> • Permeabilidad (K) • Coeficiente de almacenamiento (Ss) • Sólidos Totales Disueltos (STD) • Resistencia a compresión simple (σ) • Contenido de agua (ω) 	5E-09 m/s 0.05 /m 10,000 - 54,000 mg/l 5 - 7 kg/cm ² 250 - 275 %
Estrato Arenoso	<ul style="list-style-type: none"> • Permeabilidad (K) • Coeficiente de almacenamiento (Ss) • Sólidos Totales Disueltos (STD) • Resistencia a compresión simple (σ) • Contenido de agua (ω) 	8E-05 m/s 0.002 /m 2,000 mg/l 22 - 25 %
Formación Arcillosa Inferior	<ul style="list-style-type: none"> • Permeabilidad (K) • Coeficiente de almacenamiento (Ss) • Sólidos Totales Disueltos (STD) • Resistencia a compresión simple (σ) • Contenido de agua (ω) • Velocidad de las ondas p (Vp) 	5E-09 m/s 0.05 /m 10,000 - 50,000 mg/l 5 kg/cm ² 250 % 250 - 1100 m/s
Depósitos Aluviales Profundos	<ul style="list-style-type: none"> • Permeabilidad (K) • Coeficiente de almacenamiento (Ss) • Sólidos Totales Disueltos (STD) • Resistencia a compresión simple (σ) • Contenido de agua (ω) • Velocidad de las ondas p (Vp) 	1E-04 m/s 0.001 /m 2,000 mg/l 850 - 1,500 m/s

(Cruickshank, 1995)

9.2.2. Tipo de Vegetación.

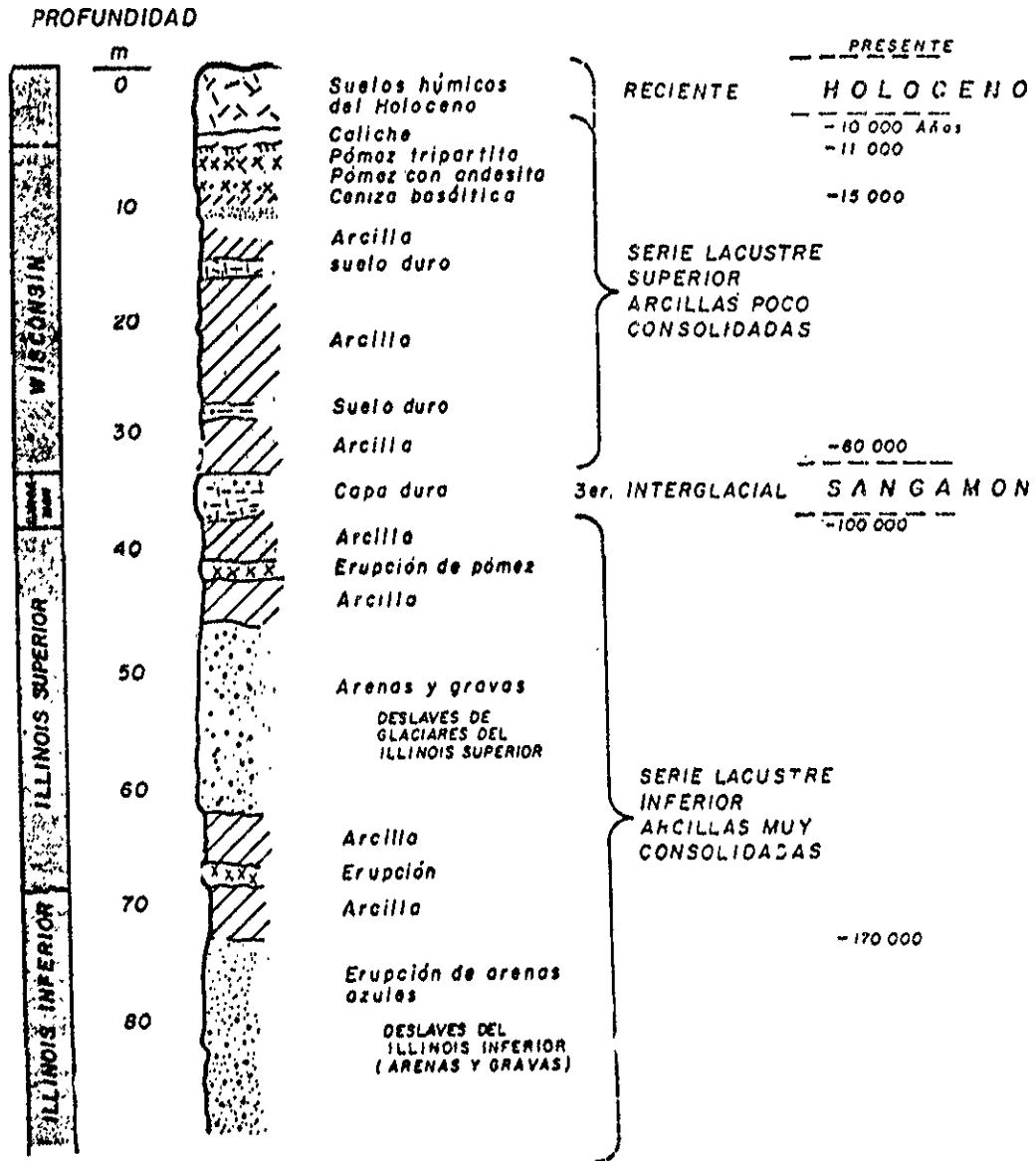
En la TABLA 9.2. se presentan las especies características de la zona.

TABLA 9.2. TIPOS DE VEGETACIÓN EN LOS SITIOS DE CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES "TEXCOCO NORTE" Y DE DISPOSICIÓN DE LODOS GENERADOS POR ÉSTA.

SITIO	TIPOS DE VEGETACIÓN
Planta de Tratamiento de Aguas Residuales "Texcoco Norte"	<ul style="list-style-type: none"> • Vegetación secundaria. • Pastizal halófilo.
"El Caracol" (Zona de disposición de los lodos de la Planta "Texcoco Norte")	<ul style="list-style-type: none"> • Vegetación secundaria.

(Cruickshank, 1995)

FIGURA 9.2. ESTATIGRAFÍA DEL EX-LAGO DE TEXCOCO.



Vegetación Secundaria. Comunidad vegetal que se origina al ser eliminada la vegetación clímax, presentando una fisonomía y composición florística diferente. Se desarrolla en áreas agrícolas abandonadas y en zonas desmontadas para diferentes usos. Aquí se incluyen las comunidades que en forma más o menos constante prosperan como acompañantes de los cultivos agrícolas o bien en los alrededores de los asentamientos humanos y a la orilla de los caminos.

Pastizal halófilo. Su presencia es debido a la desecación de las zonas lacustres originales de la Cuenca del Valle de México, formándose zonas con condiciones edáficas con alto contenido de sales y mal drenaje. Las comunidades vegetales características corresponden principalmente a las gramíneas que se reproducen vegetativamente por rizomas y estolones.

Estos pastizales halófilos son característicos de la zona del ex-Lago de Texcoco donde se encuentran constituidos por especies rastreras, herbáceas y arbustivas o arbóreas (nativas o introducidas).

9.2.3. Tipo de Fauna.

Cabe señalar que la Planta de Tratamiento "Texcoco Norte", será ubicada en la zona de "El Caracol", en los terrenos aledaños a Sosa Texcoco, por lo cual no existirán afectaciones a la fauna residente.

Sin embargo, en la región existen programas de recuperación ecológica, encontrándose una gran variedad de fauna nativa, particularmente rica en aves, por lo que se considera necesario, citar la fauna característica de la zona.

9.2.3.1. Especies Residentes.

Se consideran especies residentes aquéllas que se registran durante la mayor parte de los censos (frecuencia de 90 - 100%), que con diferentes periodicidades se han venido realizando durante los ciclos anuales en la zona federal del ex-Lago de Texcoco. A este grupo de especies pertenecen:

- Pato mexicano.
- Tildio.
- Garza capulinera.
- Pato tepalcate.
- Garza pescuezuda.
- Perro de agua.
- Lechuza llanera.
- Alondra.
- Garabito.

9.2.3.2. Especies Migratorias.

La zona federal del Lago de Texcoco se encuentra ubicada en la ruta central de migración de las aves de América del Norte, una de las cuatro rutas de vuelo usadas por estos animales en sus viajes migratorios.

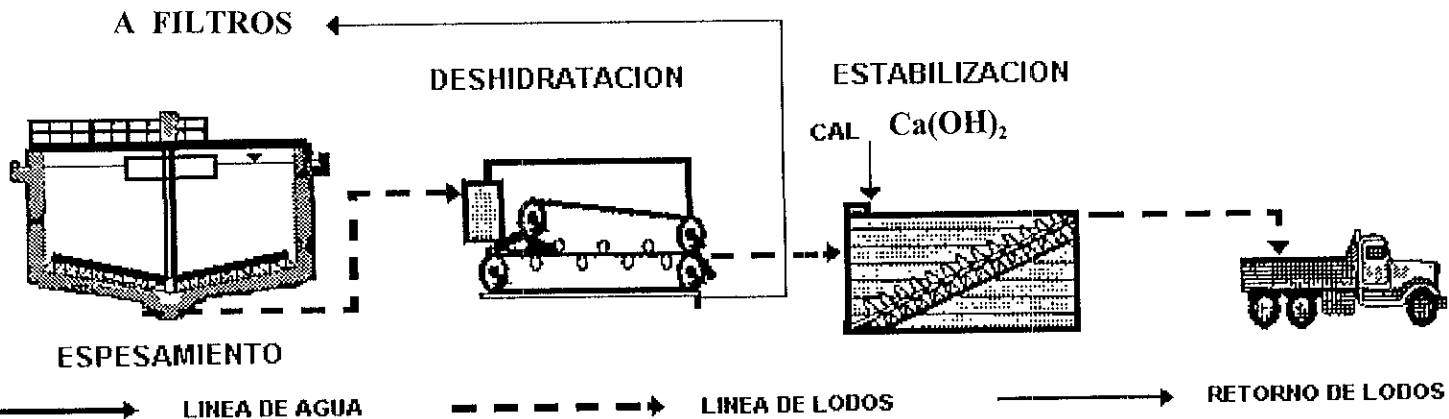
Las especies migratorias constituyen el grupo más numeroso y con poblaciones más abundantes de la avifauna de la zona federal. El período migratorio presenta dos fases: la migración otoño-invierno cuya dirección es de norte a sur del continente, y en ella se registran las aves que invernan en el sur del continente: en la migración de primavera los movimientos migratorios son de sur a norte e implica el regreso de las especies a los sitios de reproducción.

De acuerdo a lo anterior, las especies migratorias pueden subdividirse en migrantes regulares, cuyas temporadas de migración se encuentran bien definidas, ya sea en otoño, primavera o ambas estaciones, y en migrantes irregulares, que incluye las especies que no tienen definidas sus temporadas de hibernación. La mayor cantidad de especies en la zona se registra en la temporada migratoria de otoño-invierno, en los meses de septiembre a marzo. Prácticamente es en esta temporada donde se registra la mayoría de las 134 especies encontradas en el área del ex-Lago de Texcoco, ubicándose dentro de la categoría de migrantes regulares.

9.3. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE TRATAMIENTO DE LODOS.

La CNA ha considerado como primera alternativa para el tratamiento de los lodos a la estabilización con cal. Este procedimiento consiste en añadir una dosis suficiente de cal $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (dosis = 0.3 ton cal/ton lodo base seca) para elevar el pH a 12 durante dos horas y así lograr la destrucción de los microorganismos patógenos y modificar las características físicas y químicas propias de los lodos, previo espesamiento y deshidratación de los mismos (FIGURA 9.3.), para su disposición directa en terrenos del Lago de Texcoco. El volumen de lodo estabilizado mediante este método de tratamiento es de 2,588.94 $\text{m}^3/\text{día}$, con una concentración de SST del 27% (Balance de Masa. Capítulo 5).

FIGURA 9.3. ESTABILIZACIÓN CON CAL DE LOS LODOS PROVENIENTES DEL TPA.



La decisión de disponer los lodos estabilizados con cal en el ex-Lago de Texcoco responde a una inquietud económica y no de recuperación para fines agrícolas de miles de hectáreas de suelos salados con pH superior a 10. A este respecto, trabajos de investigación (Arany, 1956. Kovda, 1980) han demostrado que un mejorador de suelos que contiene calcio, no debe disponerse en suelos con pH elevados (suelos alcalinos), pues incrementa las condiciones de alcalinidad del suelo que impiden el desarrollo de vida vegetal; de esta forma, la disposición en el ex-Lago de Texcoco de lodos estabilizados con cal no contribuye a la solución del problema que significa la presencia de sodio, origen de la alta salinidad del suelo y del elevado pH.

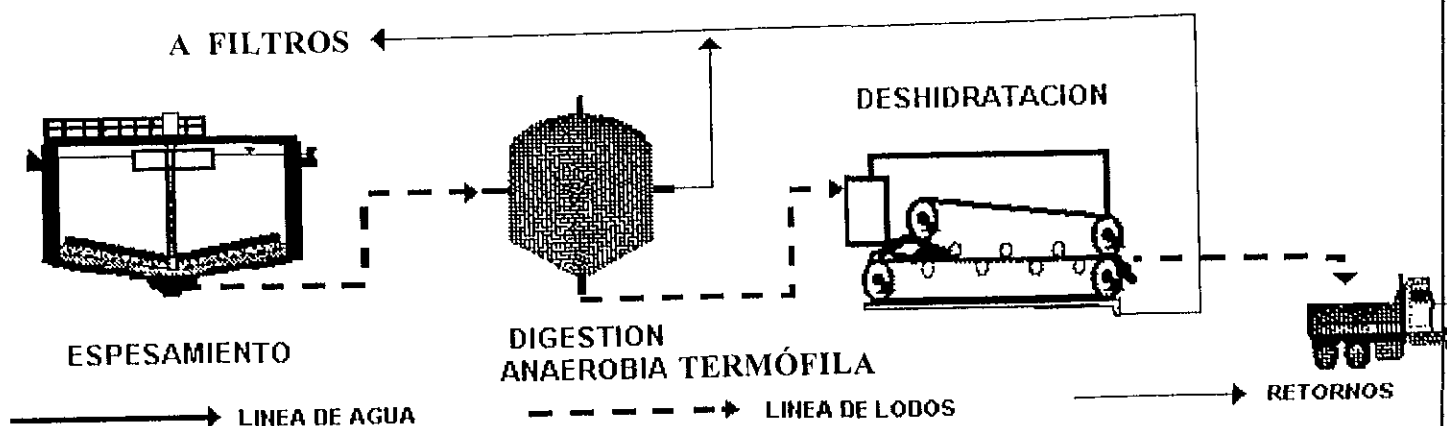
En la bibliografía mundial (Kovda (1980), Hilgard (1982), Ortega (1986)) se corrobora la inhibición de los macro y micronutrientes, esenciales para un desarrollo vegetal, en suelos similares al del ex-Lago de Texcoco (pH superior a 10).

En caso de no modificarse la decisión de tratar a los lodos mediante la adición de cal y de disponerlos directamente en el Vaso del ex-Lago de Texcoco, se condenaría a esta zona a ser únicamente sitio de almacenamiento de contaminantes, a la desaparición de la capa vegetal (pasto salado) que actualmente lo cubre y ser origen de tolvaneras que provocarían el incremento de las enfermedades respiratorias en los habitantes de la ZMCM.

En este contexto, la aportación de abonos naturales para su incorporación al suelo surge como una alternativa factible, que puede aliviar la carencia de nutrientes esenciales para una vida vegetal diversa y ser método de recuperación de los suelos salinos. Los abonos naturales pueden provenir de distintas fuentes, una de ellas son los lodos generados en los tratamientos de las aguas residuales y estabilizados biológicamente. Estos métodos alternativos de tratamiento producen lodos estabilizados con las características físicas, químicas y biológicas recomendadas por la normativa vigente, pero con condiciones compatibles para el beneficio y no el deterioro del Vaso del ex-Lago de Texcoco.

Tal es el caso de la digestión anaerobia, que es un método basado en un proceso de fermentación y mineralización en que la materia orgánica biodegradable es convertida, en ausencia de oxígeno, a metano y a bióxido de carbono principalmente. La variante de la digestión anaerobia que permite destruir los organismos patógenos es la llamada termofilia, en donde el proceso se lleva a cabo a 55°C, a diferencia de la mesofilia que se desarrolla a 35°C. La exposición de los organismos patógenos a 55°C durante 10 días, que es el tiempo que requiere el proceso para la digestión de la materia orgánica, asegura su destrucción o su desactivación, lo que elimina el riesgo a la salud y permite su reúso seguro. El tren de tratamiento propuesto se puede observar en la FIGURA 9.4. El volumen de lodo estabilizado mediante este método de tratamiento es de 1,920.74 m³/día, con una concentración de SST del 22% (Balance de Masa. Capítulo 6).

FIGURA 9.4. DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LOS LODOS PROVENIENTES DEL TPA.



En base a estos argumentos y de acuerdo a las características edafológicas del Vaso del ex-Lago de Texcoco, se sugiere el Tratamiento Biológico Anaerobio (TBA) para el tratamiento de los lodos generados por el Tratamiento Primario Avanzado (TPA), debido a que comparativamente con la estabilización con cal, el producto del tratamiento es una masa de lodos con menor volumen compuesta de materia orgánica con un pH alrededor de la neutralidad, lo que ayudará a la disminución del pH del suelo y a la disposición de micronutrientes necesarios para el crecimiento de especies vegetales.

9.4. DISEÑO DEL TRATAMIENTO ANAEROBIO DE LODOS.

Este diseño toma en consideración las características físicas, químicas y biológicas de los lodos provenientes del TPA (ver balance de masa del Capítulo 6).

Para que el análisis económico comparativo (Capítulo 10) entre la estabilización con cal y la digestión anaerobia de los lodos sea compatible, se realizará el diseño unimodular del tratamiento anaerobio de lodos, de manera que se plantea la construcción en una etapa de acuerdo al siguiente gasto medio:

$$Q_{med} = 44 \text{ m}^3/\text{s}$$

9.4.1. Diseño Del Espesador.

Se diseñará con el gasto medio (Q_{med}), de acuerdo a la TABLA 9.3. propuesta por Metcalf y Eddy.

TABLA 9.3. PARÁMETROS DE DISEÑO PARA ESPESADORES CIRCULARES.

CONCEPTO	VALOR	
	Rango	Típico
Tiempo de retención [hr.]		24
Carga superficial [m ³ /m ² d]		
• Gasto medio	32 - 48	40
• Gasto pico	80 - 120	100
Carga sobre el vertedor [m ³ /md]	125 - 500	250
Dimensiones		
• Profundidad [m]	3 - 5	4
• Diámetro [m]	3 - 60	12 - 50
• Pendiente del fondo [in/ft]	¾ - 2	1
• Velocidad de las rastras [r.p.m.]	0.02 - 0.05	0.03

(Metcalf and Eddy, 1991)

9.4.1.1. Memoria de Cálculo.

Para realizar el diseño del espesador, se conocen los siguientes datos:

Influente del Espesador:

CARACTERÍSTICAS DEL INFLUENTE	VALOR
Gasto medio (Q_{med})	0.45 m ³ /s.
Peso (W)	40,200.00 ton/día.
Peso específico (γ)	1.01 ton/m ³ .
Volumen (V)	39,005.948m ³ /día
Concentración de sólidos	2%
Contenido de sólidos	804,000 kg/día
Carga de sólidos (C.S.)	99 kg*m ² *día
Concentración de sólidos en el efluente	7%

DATOS OBTENIDOS DEL BALANCE DE MASA.

C.S. ref. (Syed, 1991).

Se diseñarán 10 unidades en paralelo.

A) Obtener el gasto que circulará por cada espesador:

• Gasto medio = 3,888.00 m³/día.

B) Determinar el área superficial basada en el contenido de sólidos y la C.S. de las bases de diseño.

$$C. S. = 99 \text{ kg} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{d}$$

$$A. S. = \frac{\text{Cont. Solid.}}{C. S.} = \frac{804,000}{99} = 8,121.21 \text{ m}^2$$

C) Calcular el diámetro del espesador:

El área por espesador es: $A = 8121.21/10 = 812.12 \text{ m}^2$

$$A = 0.25 \pi D^2$$

$$D = \sqrt{\frac{A}{0.25 \times \pi}} = \sqrt{\frac{812.12}{0.25 \times \pi}} = 32.16 \text{ m} \approx 105.5 \text{ ft}$$

$D = 32.16 \text{ m} < 60 \text{ m}$ es aceptable de acuerdo a los rango establecidos

Se elige el diámetro comercial $\phi_{com} = 35 \text{ m}$.

D) Calcular el área para el diámetro comercial:

$$A = 0.25 \pi D^2 = 0.25 \pi (35)^2 = 962.11 \text{ m}^2$$

E) Calcular el volumen basados en la concentración de sólidos en el efluente:

$$V = 0.25 \pi D^2 * H = 0.25 \pi (35)^2 H \\ = 962.11 H$$

De acuerdo a la concentración de sólidos (7%) y a su peso específico ($\gamma = 1023 \text{ kg/m}^3$), resulta:

$$V_{\text{real}} = V (\text{Concentración solid. Efl.}) \gamma = 962.11 H (0.07) 1023 = 68,896.9 H$$

F) Calcular la altura basados en el tiempo de retención ($t_r = 1 \text{ d}$):

$$t_r = V_{\text{real}} / \text{Cont. Solid por digester} \\ 1 = 68,896.9 H / 80,400 \\ H = 0.86 \text{ m}$$

G) Calcular la altura final:

bordo libre	= 0.6 m
altura del agua	= 1.0 m
altura de la mezcla	= 1.5 m
altura del lodo espesado	= 0.86 m
TOTAL	= 3.96 m

9.4.1.2. Resultado.

De acuerdo a los diversos parámetros de diseño las dimensiones definitivas de los 10 espesadores son:

- Diámetro = $\phi = 35 \text{ m}$.
- Profundidad = $h = 3.96 \text{ m}$.
- Volumen = $V = 3,809.96 \text{ m}^3$.

9.4.2. Digestor Anaerobio.

9.4.2.1. Diseño del Digestor Anaerobio.

A) Para realizar el diseño del digestor anaerobio, se conocen los siguientes datos:

Influente del Digestor:

CARACTERÍSTICAS DEL INFLUENTE	VALOR	
Peso total (W_t)	9,762.86 ton/día.	113.00 kg/s*m ³
Peso sólidos (W_s)	683.40 ton/día.	7.91 kg/s*m ³
Peso específico (γ)	1.023 ton/m ³ .	-
Volumen total (V_t)	9,543.36 m ³ /día.	2.51 l/s*m ³

DATOS OBTENIDOS DEL BALANCE DE MASA.

B) Cálculo de los sólidos suspendidos totales:

$$SST = \frac{W_{sol}}{V_{tot}} = \frac{0.18}{2.51} = 0.07161 \frac{kg}{lt} = 71,610 \frac{mg}{lt}$$

C) Cálculo de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):

En proporción de la concentración de SST en el lodo (0.9 de SST) (Metcalf and Eddy, 1991):

$$SST = 71,610 \text{ mg/lt} \quad \rightarrow \quad DBO = 64,449 \text{ mg/lt} = 64.45 \text{ kg/m}^3$$

D) Cálculo de la Carga de DBO:

$$\begin{aligned} CDBO &= DBO(Q_{mf}) \\ CDBO_{tot} &= (64.45) (9,543.36) = 615,069.55 \text{ kg/día.} \\ CDBO_{SSV} &= 615,069.55/2 = 307,534.78 \text{ kg/día} \end{aligned}$$

E) Cálculo del volumen del digestor.

Los parámetros de diseño se presentan en la TABLA 9.4.:

TABLA 9.4. PARÁMETROS DE DISEÑO DE DIGESTORES ANAEROBIOS.

PARÁMETROS DE DISEÑO	VALOR
Temperatura	55 °C
Carga Volumétrica (CV)	4.8 kg SSV/m ³ *d
Producción de Gas	0.26 m ³ /kg SSV
Eficiencia de producción de sólidos volátiles(η)	0.60

Sambhunath, 1992.

$$V = \frac{CDBO_{ssv}}{CV} \approx \frac{307,534.78}{4.8} \approx 64,069.75 \text{ m}^3.$$

F) Cálculo del tiempo de retención hidráulica (TRH):

$$TRH = \frac{V_{dig}}{Q_{entrada}} \approx \frac{64,069.75}{9,543.36} \approx 6.7 \text{ días}$$

G) Cálculo de las dimensiones del digestor anaerobio:

DIMENSIONES	NÚMERO DE TANQUES
<ul style="list-style-type: none"> • Diámetro = ϕ = 20 m. • Profundidad = h = 10 m. 	20
<ul style="list-style-type: none"> • Diámetro = ϕ = 25 m. • Profundidad = h = 10 m. 	13
<ul style="list-style-type: none"> • Diámetro = ϕ = 30 m. • Profundidad = h = 15 m. 	6

H) Producción total de gas (V_{TGAS}):

$$V_{TGAS} = CDBO_{ssv} * Pr od. gas = 307,534.78(0.26) = 79,959.04 \text{ m}^3/d$$

I) Volumen de metano producido (V_{CH_4}):

$$V_{CH_4} = V_{TGAS} * 0.67 = 79,959.04 * 0.67 = 53,572.56 \text{ m}^3/d$$

J) Cálculo de la cantidad de calor generada por el biogás (ΔC_T):

$$CP_{BIOGAS} = 6,880 \text{ kcal/m}^3$$

$$\begin{aligned} \Delta C_T &= V_{TGAS} * CP_{BIOGAS} = 79,959.04 * 6,880 = 550,118,195 \text{ kcal/d} \\ &= 550,118,195 (4.184) = 2,301,694,529 \text{ KJ/d} \end{aligned}$$

9.4.2.2. Requerimientos Caloríficos para el Digestor Anaerobio.

A) Capacidad del Digestor:

$$\begin{aligned} \text{Capacidad útil por digestor} &= CUD = 64,069.75 \text{ m}^3 / (6 \text{ digestores}) = 10,678.30 \text{ m}^3/\text{digestor} \\ &= 10,998.65 \text{ ton/digestor} \\ &= 1,641.59 \text{ ton/digestor} * \text{día} \\ \text{Capacidad total por digestor} &= CTD = CUD + 15\% CUD = 12,280.04 \text{ m}^3/\text{digestor}. \end{aligned}$$

B) Requerimientos de calor para el lodo:

En la TABLA 9.5. se presentan los valores típicos para determinadas estructuras.

TABLA 9.5. COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

ESTRUCTURA	COEFICIENTES (BTU/lb*°F)
Muros	<ul style="list-style-type: none"> • sin insolación: 0.90 • con insolación: 0.14
Piso	<ul style="list-style-type: none"> • con nivel freático: 0.12 • sin nivel freático: 0.07
Techo	<ul style="list-style-type: none"> • acero: 0.95

(Metcalf and Eddy, 1991)

$$1 \text{ BTU/lb*}^\circ\text{F} = 4,200 \text{ J/kg*}^\circ\text{C}$$

Temperaturas existentes en los diversos elementos y el ambiente:

ELEMENTO	TEMPERATURA (°C)
Lodo al influente del digestor	20
Lodo en el interior del digestor	55
Tierra superficial	20
Tierra profunda	25

$$q_l = CUD (\Delta T) (U_l)$$

$$q_l = 1,641,589 (55 - 20) (4.2) = 241,313,642 \text{ KJ/día.}$$

$$= 10,054,735 \text{ KJ/hr.}$$

C) Cálculo de las áreas tributarias:

ESTRUCTURA	ÁREA (m ²)
Paredes: $[A = \pi (\phi) h] = \pi (30) 10$ $= \pi (30) 5$	<ul style="list-style-type: none"> • sobre la superficie: 942.50 • debajo de la superficie: 471.25
Piso: $[A = \pi (r) g]$	4,417.86
Techo $[A = \pi (r)^2]$	2,826

D) Pérdida por transferencia de calor:

$$q = U (A) (\Delta T)$$

Paredes:

$$q_1 = [0.12 (4,200)] (55 - 20) (471.25) + [0.52 (4,200)] (55 - 20) (942.5) = 80,357.60 \text{ KJ/día} \\ = 3,348.23 \text{ KJ/hr.}$$

Piso:

$$q_2 = [0.12 (4,200)] (55 - 20) (4,417.86) = 77,931.05 \text{ KJ/día} \\ = 3,247.13 \text{ KJ/hr.}$$

Techo:

$$q_3 = [0.95 (4,200)] (55 - 20) (2,826) = 394,650.90 \text{ KJ/día} \\ = 16,443.79 \text{ KJ/hr.}$$

Las pérdidas totales son:

$$q_t = q_1 + q_2 + q_3 = 23,039.15 \text{ KJ/hr}$$

E) Cálculo de la capacidad del intercambiador de calor (Cap_{ic}):

$$Cap_{ic} = q_t + q_i = 10,054,735 + 23,039.15 = 10,077,774.15 \text{ KJ/hr} \\ = 40,311,097 \text{ KJ/día por cada digestor} \\ = 241,866,580 \text{ KJ/día}$$

F) Cálculo de la pérdida de temperatura del lodo si se detiene el funcionamiento del intercambiador de calor por 24 hrs.

$$\Delta T = \frac{Cap_{ic} [24]}{W_{lodo} (\Delta_{esp})} = \frac{10,077,774.15(24)}{9,501.25(4,200)} = 6.06^\circ\text{C}$$

G) Necesidades de energía:

Para mantener la temperatura de 55°C en los 6 digestores es necesaria una energía equivalente a 241,866,580 KJ/día y el biogás puede proporcionar 2'301,694,529 KJ/día. Por lo tanto son digestores autosuficientes en sus requerimientos de energía.

9.4.3. Diseño del Deshidratador de Filtro Prensa.

A) Consideraciones:

$$\begin{aligned}
 W_L &= 395.88 \text{ ton/m}^3 \text{ día} = 9,501.25 \text{ ton/día} \\
 V_L &= 384.35 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ día} = 9,224.51 \text{ m}^3/\text{día} \\
 S_{s,mi} &= 7\% \\
 \text{Operación} &= 8\text{h/día, } 5\text{días/sem} \\
 \text{Carga para el filtro prensa=CFP} &= 600\text{lb/m hr} = 272.4 \text{ kg/m hr} = 0.2724 \text{ ton/m hr} \\
 S_{s,efl} &= 22\%
 \end{aligned}$$

B) Cálculo de la cantidad de lodo en el influente del filtro banda:

$$\begin{aligned}
 W_L &= V_L(d)\gamma_L \\
 &= (9,224.51)(7)(1.03) = 66,508.72 \frac{\text{ton}}{\text{sem}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_s &= W_L(Ss) \\
 &= 66,508.72 (0.07) = 4,655.61 \frac{\text{ton}}{\text{sem}}
 \end{aligned}$$

C) Cálculo de los requerimientos diarios y horarios de procesamiento de sólidos secos durante el proceso:

$$\begin{aligned}
 \text{diario} = Dr &= \frac{W_s}{d} \\
 &= 4,655.61/(5) = 931.12 \frac{\text{ton}}{\text{día}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{horario} = Hr &= \frac{\text{diario}}{\text{hrs}} \\
 &= 931.12/8 = 116.39 \frac{\text{ton}}{\text{hr}}
 \end{aligned}$$

D) Cálculo del ancho de banda (máx. 3.5 m):

$$\begin{aligned}
 A_b &= \frac{\text{horario}}{\text{CFP}} \\
 &= 116.39/0.2724 = 427.28 \text{ m} / 3.5 \text{ m} = 122 \text{ bandas.}
 \end{aligned}$$

CAPÍTULO 10

ANÁLISIS FINANCIERO

El objetivo del estudio financiero, es identificar y desarrollar un plan preliminar de financiamiento en función de las inversiones que demande el proyecto de la Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte", considerando las potenciales fuentes de financiamiento.

En los proyectos de inversión, existe una coordinación estrecha entre los aspectos técnicos, económicos, sociales y los referentes a las finanzas y contabilidad, es decir, los aspectos financieros.

La información del estudio de mercado y aspectos técnicos y de planeación, sirven de base para la elaboración de los presupuestos de inversión, de costos y gastos, que serán presentados en forma ordenada y sistemática a través de cuadros y estados financieros, concluyendo en un conjunto de proyecciones financieras. A su vez, el estudio financiero será la base para la evaluación económica del proyecto, con lo que se gestionará el financiamiento que éste demande para su ejecución y puesta en marcha.

Es importante aclarar que la integración de los aspectos financieros maneja elementos y conceptos de contabilidad, pero no es propiamente hacer contabilidad, pues ésta se aplica sobre resultados por ejercicio y el estudio del proyecto se basa en proyecciones, las cuales están sustentadas en supuestos económicos y financieros.

El estudio financiero del proyecto comúnmente contiene las inversiones, el financiamiento, los presupuestos de operación y los estados financieros.

El análisis financiero debe estar conformado por los siguientes puntos:

- Entorno del proyecto.
- Información de los costos de capital, construcción, operación y mantenimiento.
- Presentación del programa de financiamiento y supuestos.

10.1. INVERSIONES EN EL PROYECTO.

Las inversiones en un proyecto son el capital, ya sea propio o de terceros, que se pone en juego con el objeto de operar una empresa. Se constituyen por la suma del valor de los bienes, servicios y efectivo existente y necesario para realizar las funciones de producción, distribución y venta de bienes y/o servicios. Por tanto, el análisis y cálculo de las inversiones en los estudios de preinversión tienen una caracterización productiva y no especulativa, se invierte para formar o incrementar capital, comprando bienes para producir satisfactores.

Las inversiones para efectos de cálculo se clasifican desde el punto de vista económico en fijas, diferidas y capital de trabajo; las dos primeras se desembolsan en la etapa previa a la operación y la última cuando la empresa arranca.

10.1.1. Inversiones Fijas.

Son aquéllas que tienden a permanecer inmovilizadas durante la operación de la empresa, son bienes tangibles que se adquieren generalmente al inicio del proyecto y por una vez, teniendo una vida de largo plazo, pudiendo ser realizables con cierta facilidad, aunque no son objeto de transacciones corrientes. Están sujetas a depreciación y obsolescencias, a excepción de los terrenos.

10.1.2. Inversiones Diferidas.

Son conocidas también como activos intangibles; los gastos y cargos diferidos se denominan así porque su recuperación es en el largo plazo, difiriéndose año con año en los gastos de operación. En el caso de los proyectos de inversión la totalidad de dichas inversiones se efectúa en el período previo a la operación, estando sujetas a amortización.

10.1.3. Capital de trabajo.

Para los proyectos nuevos es el monto de dinero necesario para iniciar las labores de producción y venta de la empresa, hasta el momento en que ésta es capaz de generar una cantidad de ingresos suficientes para cubrir el total de sus costos y gastos. El capital de trabajo sigue el ciclo de dinero-producto/servicio-dinero, por lo que es finalmente efectivo. Sin embargo, puede existir una parte que permanece inmovilizada como inventarios y cuentas por cobrar, aunque generalmente es de realización en el corto plazo.

10.2. FINANCIAMIENTO.

El financiamiento del proyecto necesariamente implica un análisis del costo del capital, detectando la opción más conveniente para la empresa, es decir, la fuente de recursos más accesible y económica de operar, lo que implica conocer todas las alternativas existentes.

10.2.1. Necesidades de capital.

Las necesidades de inversión se expresan como el monto de recursos financieros que la empresa necesitará, ya sea para cubrir el inicio de la construcción y ejecución, la compra de activos fijos y/o los requerimientos del capital de trabajo, para poder comenzar a operar.

De este modo para determinar el financiamiento global que demandará el proyecto, se deberá tomar en cuenta:

- La clasificación de las inversiones.
- El programa de inversiones anual.
- La aportación de capital y/o el flujo de caja.

10.2.2. Fuentes de financiamiento.

Es necesario detectar y analizar las fuentes de financiamiento posibles para el proyecto, siendo realista desde un principio en cuanto al acceso a cada una de ellas. En general, los recursos financieros provienen de dos fuentes: internas y externas al proyecto.

10.2.2.1. Fuentes externas.

10.2.2.1.1. Bancos y Fideicomisos.

Esta opción está constituida por el conjunto de instituciones de crédito privadas y/o públicas, tanto nacionales como extranjeras. Generalmente existen dos tipos de instituciones, las de Banca Múltiple y las de Banca de Desarrollo. Las primeras son los bancos comerciales y las segundas están formadas por los bancos, fideicomisos de éstos y sociedades financieras que se abocan al fomento específico de las actividades económicas y sociales, por lo que ofrecen la mayoría de sus financiamientos en condiciones preferenciales.

Cabe mencionar que la mayoría de las instituciones de fomento en la actualidad son bancos de 2do. piso, esto es que operan a través de los bancos de 1er. piso que tienen ventanillas al público, dentro de los cuales se encuentra la banca comercial, por lo que requieren de estos intermediarios para colocar sus recursos.

Entre algunos tipos de préstamos tenemos:

- Préstamos de Garantía Colateral: sirven para financiar activos circulantes en los cuales se ofrece como garantía, además de los documentos de venta en abonos, los títulos de crédito de la cartera de los clientes. Estos financiamientos también pueden actuar como créditos puente mientras se concretan operaciones a largo plazo.
- Líneas de crédito: Este es un crédito de tipo revolvente o de cuenta corriente, de tal forma de que el acreditado puede disponer de los recursos nuevamente, toda vez que sus saldos lo permitan. Fundamentalmente se destina a financiar ventas y gastos de producción, dándole liquidez a la empresa.

10.2.2.1.2. Agencias de crédito.

El incremento en el volumen de las negociaciones en este siglo, así como el aumento de importadores y exportadores ha traído consigo también una serie de incrementos en los riesgos inherentes a cualquiera de estas negociaciones.

De ahí que aparecieran las Agencias de Crédito (ECAs, por sus siglas en inglés), cuya principal función es la de proveer un seguro contra riesgos políticos y comerciales, al brindar préstamos a bancos comerciales, para que ellos, como intermediarios brinden el dinero a las compañías deudoras.

Entre los riesgos comerciales se cubren aquéllos como el cambio en las tasas de interés, movimientos de precios a nivel internacional, etc.

Entre los riesgos políticos se cubre eventualidades como son guerras, cambios en la paridad monetaria de parte del país que está importando, lo que previene al importador de realizar algún pago.

a) Berne Union.

La Unión Internacional de Crédito y Aseguradores de Inversiones fue fundada en 1934. Está formada por más de 40 organizaciones de más de 30 países exportadores, dedicadas a brindar las garantías contra riesgos comerciales y políticos.

b) The Export Credits Guarantee Department (ECGD).

El Departamento de Garantías de Créditos a la Exportación de la Gran Bretaña es un departamento gubernamental, establecido en 1919, que tiene el control de todas las agencias de crédito de aquel país. Su función es cubrir los financiamientos de corto, mediano y largo plazo, así como los riesgos de los inversionistas ingleses en sus inversiones en el extranjero.

c) The Export Development Corporation (EDC).

Esta organización canadiense provee seguros, financiamientos y garantías a corto, mediano y largo plazo, en muchos casos similares a cualquier agencia internacional de crédito.

d) Export-Import Bank (Eximbank).

Esta fuente de financiamiento estadounidense cuenta con programas de créditos de exportación, garantías y fondos.

e) Japan Export-Import Bank (Jexim).

Este banco otorga créditos para proveedores que promuevan inversiones e importaciones, así como créditos directos a organizaciones internacionales para el otorgamiento de préstamos. Puede formar parte también de acuerdos de co-financiamiento con organizaciones tales como el Banco Mundial.

f) Fondos Multilaterales y Bilaterales.

f.1.) World Bank (WB).

La sede del Banco Mundial se encuentra en Washington, D.C. en los Estados Unidos, integra a 157 países miembros y en su conjunto representa la mayor fuente de financiamiento para la exportación. El banco se fundó a través de las suscripciones de sus miembros, por consecuencia se otorgan préstamos para los diferentes fines de desarrollo a tasas de interés comercial.

f.2.) International Finance Corporation (IFC).

Es una filial del Banco Mundial fundada en 1966, diseñada para apoyar a la iniciativa privada en el sector de la industria y promover el surgimiento de los mercados de capital de los países en desarrollo. El IFC ha realizado 88 transacciones en un total de 26 países. La mayoría de éstas se han llevado a cabo en los últimos 7 años y han incluido Latinoamérica (Argentina, Chile, Guatemala, El Salvador, Belice y México), Asia (Filipinas, Corea, India, Nepal, Sri Lanka), Europa (Hungria, Polonia), el Medio Oriente (Omán) y África (Zimbabue, Zaire).

El IFC es actualmente la corporación independiente más grande que brinda financiamiento a compañías privadas para apoyar el crecimiento de países en desarrollo, otorgando préstamos, capital, consultoría y otros instrumentos financieros para la inversión.

f.3.) Banco Interamericano de Desarrollo.

Este banco opera de manera similar al WB, tanto en su operación como en sus procedimientos de oferta. Su apoyo se concentra hacia proyectos no subsidiados, es decir los proyectos que demuestren su viabilidad.

10.2.3. Condiciones y Programas de Financiamiento.

Cuando el proyecto pretende complementar las inversiones con créditos de cualquiera de las opciones vistas anteriormente, los acreedores van a imponer determinadas condiciones para otorgar los préstamos, las cuales se deben conocer de antemano e incorporar al estudio financiero.

Así también existen programas específicos de financiamiento, sobre todo de la banca de desarrollo, del gobierno Federal y de organismos internacionales, que es preciso conocer, debido a que las condiciones de financiamiento suelen variar dependiendo del programa en el que se encuentre el tipo de proyecto.

Las condiciones del financiamiento que es necesario conocer son:

- Empresas Elegibles, tipo de empresa a que se destina el crédito.
- Plazos de Pago, el período en el que se debe amortizar la deuda.
- Forma de Pago, referente al tipo de moneda, periodicidad en los pagos y manera de hacerlos.
- Tasa de Interés, la base sobre la que se fija y el tipo de tasa que se aplica al capital.
- Monto Financiable, el porcentaje que puede financiar el acreedor sobre el total de las necesidades del proyecto.
- Períodos de Gracia, la posibilidad de pagar sólo intereses por algún tiempo sin amortizar al capital principal.
- Comisiones, porcentaje sobre el préstamo por apertura del crédito y otros gastos.
- Garantías, monto con respecto al total del crédito.
- Mecanismos y tiempos de Disposición.

10.3. CORRIDA FINANCIERA.

La corrida financiera es un instrumento de cálculo que nos permite definir, basados en las premisas actuales y futuras, las condiciones económicas y financieras que presentará el proyecto a lo largo del horizonte económico que se haya contemplado.

El análisis financiero que se presenta a continuación se refiere a las alternativas de tratamiento:

- Tratamiento Primario Avanzado con estabilización de lodos con cal.
- Tratamiento Primario Avanzado con digestión anaerobia termófila de los lodos.

cuyos resultados se presentan en el orden siguiente:

- Premisas.
- Estimaciones de Ingreso.
- Estimaciones de construcción y operación.
- Estimaciones de crédito.
- Estado de Resultados.
- Orígenes y aplicaciones.

Las variables consideradas dentro de la corrida financiera fueron:

- Tarifa por m³ tratado.
- Producción de lodos de acuerdo al sistema de tratamiento (estabilización con cal o biológico anaerobio).
- Tarifa por transporte (bombeo, carretero y férreo).
- Distancia del sitio de disposición final (0 - 100 km).





Los costos de la infraestructura de tratamiento de aguas residuales y de lodos que aparecen en las premisas de la corrida financiera fueron calculados a través de "CAPDET" (A Computer Assisted Program for the design of wastewater treatment facilities. Version 2.04 of Hydromantys, Inc.).

10.3.1. Tratamiento Primario Avanzado con Estabilización de los lodos con cal.

10.3.1.1. Premisas.

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".

Premisas TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO CON ESTABILIZACIÓN DE LOS LODOS CON CAL.





-  Calculado en esta hoja
-  Proviene de esta misma hoja
-  Proviene de otra hoja
-  Dato

Ident	Tipo	Concepto	Nota	Nota
1		Proyecto		
2		Concesión	años	20 1 años Const
3		Costo	USD	270,695,431.58
4		Ingresos		
5		Total de Agua Residual	44 m ³ /s	1,387,584,000 m ³ trat/año
6		Tarifas por m ³	USD por m ³ tratado	0.08301
7		Gastos Operativos (anuales)		
8		Operación y Mantenimiento	anuales	37,228,532.00
9		Administración	% sobre ingresos brutos	21.00%
10		Presupuesto		
11		Planta de bombeo y tubería presión	Costo Total	2,616,024.00 % 0.97%
12		Colectores márgenes izq. y der.	Costo Total	6,771,496.00 % 2.50%
13		Pretratamiento	Costo Total	9,073,152.00 % 3.35%
14		Sedimentador del TPA	Costo Total	23,930,720.00 % 8.84%
15		Filtración	Costo Total	61,658,872.00 % 22.78%
16		Cloración	Costo Total	9,847,288.00 % 3.64%
17		Espesador	Costo Total	7,090,732.00 % 2.62%
18		Estabilización con cal apagada	Costo Total	3,520,000.00 % 1.30%
19		Filtros Banda	Costo Total	37,338,620.00 % 13.79%
20		Costo del terreno	Costo Total	1,730,159.00 % 0.64%
21		Cimentaciones	Costo Total	20,000,000.00 % 7.39%
22		Edificios	Costo Total	14,523,809.00 % 5.37%
23		Parcial	Costo Total	198,100,872.00 % ACUM 73.18%
24		Imponderables (20%)	Costo Total	39,620,174.40 % 14.64%
		Total (sin IVA e intereses)	Costo Total	237,721,046.40 % ACUM 87.82%
25		IVA (15% incluido)	Costo Total	0.00 % 0.00%
26		Intereses Durante Construcción	Costo Total	32,974,385.18 % 12.18%
27		Total	Costo Total	270,695,431.58 % ACUM 100.00%
28		Contraprestación	% sobre ingresos brutos	0.00%

(CAPDET, Hydromantys, Inc)

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".

Premisas TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO CON ESTABILIZACION DE LOS LODOS CON CAL.

-  Calculado en esta hoja
-  Proviene de esta misma hoja
-  Proviene de otra hoja
-  Dato

Ident	Tipo	Concepto	Nota	Nota
29		Financieras		
30		Estructura Financiera		
31		Capital	0.00	% 0.00%
32		Créditos	237,721,046.40	% 100.00%
33		Total	237,721,046.40	% ACUM 100.00%
34		Financiamiento •		
35		Plazo del Crédito	años 10	
36		Gracia Pago de Principal	años 2	
37		Tasa de Interés Crédito	Durante Construcción 11.11%	11.00%
38		Base	Basado en Cupón de Eurobono 9.25%	
39		Spread	1.75%	
40		Up-Front Fee	Comisión de Apertura 0.90%	
41		Commitment Fee	Comisión de Compromiso 0.00%	
42		Exposure Fee	Prima de Riesgos 0.00%	
43		Otros Gastos	Estimado 50,000	
44		Rendimiento de Inversiones	Supuesto Anual 5.50%	
45		Fiscales		
46		Withholding Tax	% 1.00%	
47		Depreciación del Inmueble	% anual 5.00%	
48		Impuesto Predial	% anual 0.00%	
49		IVA (15% incluido)	% 0.00%	
50		ISR	% anual 30.00%	
51		IMPAC	% anual 2.00%	
52		Transporte		
54		Producción de lodos	anual (ton/año) 1,039,534.60	
55		Bombeo	costo anual (\$USDm ³ anual/km) •• 80,044.16	0.077 C.U.(\$USDm ³ /Km)
56		Carretero	costo anual (\$USDm ³ anual/km) ••• 649,709.13	0.625 C.U.(\$USDm ³ /Km)
57		Férreo	costo anual (\$USDtonanual/km) •••• 103,953.46	0.100 C.U.(\$USDton/ Km)

- (Banco Interamericano de Desarrollo) •
- (Comisión Nacional del Agua) ••
- (Ingenieros Civiles Asociados) •••
- (Transportación Ferroviaria Mexicana) ••••

10.3.1.2. Estimaciones de Ingreso.

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".												
Parámetros TPAC con ESTIMACIONES DE LOS LOGROS COLECTAL												
Años												
Ident	Concepto	Nota	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Demanda		1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000
2	Demanda anual de tratamiento	(m³)										
3	Tarifa por m³ tratado	(USD)	0.08301	0.08426	0.08552	0.08680	0.08810	0.08943	0.09077	0.09213	0.09351	0.09491
4	Ingreso Anual	(USD)	115,103,347.84	116,911,098.06	118,564,764.53	120,444,736.00	122,251,407.04	124,085,178.14	125,946,455.81	127,835,652.95	129,753,187.44	131,699,465.25

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".												
Parámetros TPAC con ESTIMACIONES DE LOS LOGROS COLECTAL												
Años												
Ident	Concepto	Nota	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1	Demanda		1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000
2	Demanda anual de tratamiento	(m³)										
3	Tarifa por m³ tratado	(USD)	0.09634	0.09778	0.09925	0.10074	0.10225	0.10378	0.10534	0.10692	0.10852	0.11013
4	Ingreso Anual	(USD)	133,674,977.53	135,660,102.19	137,715,303.73	139,781,033.26	141,877,748.78	144,005,915.01	146,168,003.74	148,358,493.80	150,583,671.20	152,833,851.20

10.3.1.3. Estimaciones de Operación y Construcción.

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".		Programa TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO CON ESTABILIZACION CON CAL.		
Ident	Tipo Concepto	Años		
		Totales		
1	Planta de bombeo y tubería a presión	2,616,024.00	2,616,024.00	0.00
2	Colectores de las márgenes izquierda y derecha	6,771,496.00	6,771,496.00	0.00
3	Pretratamiento	11,708,604.00	9,073,152.00	2,635,452.00
4	Sedimentador del Tratamiento Primario Avanzado	38,559,294.00	23,930,720.00	14,628,574.00
5	Filtración	63,617,506.00	61,658,872.00	1,958,634.00
6	Cloración	15,088,096.00	9,847,288.00	5,240,808.00
7	Espesador	7,622,238.00	7,090,732.00	531,506.00
8	Estabilización con cal apagada	2,200,000.00	3,520,000.00	2,855,491.00
9	Filtros Banda	59,014,692.00	37,338,620.00	3,173,308.00
10	Costo de terreno	1,730,159.00	1,730,159.00	0.00
11	Cimentaciones	20,000,000.00	20,000,000.00	0.00
12	Edificios	12,142,857.00	14,523,809.00	0.00
13	Imponderables	43,215,198.40	39,620,174.40	6,204,759.00
14	IVA	38,893,678.56	0.00	0.00
15	Transporte			
16	Total	237,721,046.40	237,721,046.40	37,228,532.00
17				
18	Gastos Financieros Construcción	32,974,385.18	32,974,385.18	

(CAPDET, Hydromantys, Inc)

10.3.1.4. Estimaciones de Crédito.

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".
Financiamiento TPA CON ESTABILIZACIÓN DE LOS LODOS CON CAL.

Ident	Concepto	Años					
		1	2	3	4	5	6
	Totales (USD)	270,946,483.23	75,750,408.90	0.00	0.00	0.00	0.00
1	Disposiciones	317,389,372.28	75,750,408.90	0.00	0.00	0.00	0.00
2	Saldo inicial	-29,307,519.86	346,696,892.13	317,581,088.50	285,230,195.58	249,284,759.00	
3	Intereses	29,804,113.16	38,136,658.13	34,933,919.74	31,375,321.51	27,421,323.49	
4	Witholding Tax	301,051.65	385,218.77	352,867.88	316,922.44	276,983.07	
5	Principal	0.00	0.00	29,115,803.63	35,945,436.58	39,939,373.98	
6	Pago Total	30,105,164.80	38,521,876.90	67,637,680.53	67,637,680.53	67,637,680.53	
7	Saldo Final	270,946,483.23	346,696,892.13	317,581,088.50	285,230,195.58	249,284,759.00	
8	Comisiones	3,170,272.03	3,170,272.03	0.00	0.00	0.00	
9	Costo All-in	-237,671,046.40	-34,058,259.97	67,637,680.53	67,637,680.53	67,637,680.53	
10							
11							
12	Inversiones (Caja)						
13							
14	Depósitos	-	59,974,107.76	-	-	-	-
15	Saldo inicial	-	59,974,107.76	-	-	-	-
16	Intereses	-	-	-	-	-	-
17	Disposición de Principat	-	59,974,107.76	-	-	-	-
18	Disposición Total	-	59,974,107.76	-	-	-	-
19	Saldo final	-	-	-	-	-	-

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Tencoco Norte".
Financiamiento TPA CON ESTABILIZACIÓN DE LOS LODOS CON CAL.

Ident	Tipo	Concepto	Totales (USD)	Años									
				7	8	9	10	11	12	13			
1		Disposiciones	346,696,892.13	317,389,372.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2		Saldo Inicial		-29,307,519.86									
3		Intereses	260,401,277.91	209,345,385.02	164,968,302.82	115,660,433.71	60,873,912.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4		Witholding Tax	2,630,315.94	23,027,992.35	18,146,513.31	12,722,647.71	6,696,130.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5		Principal	346,696,892.13	232,605.98	183,298.11	128,511.59	67,637.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6		Pago Total	609,728,485.98	44,377,082.20	49,307,869.11	54,786,521.23	60,873,912.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7		Saldo Final		67,637,680.53	67,637,680.53	67,637,680.53	67,637,680.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8		Comisiones	6,340,544.06	164,968,302.82	115,660,433.71	60,873,912.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9				0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10		Costo Alt-in		67,637,680.53	67,637,680.53	67,637,680.53	67,637,680.53	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11			14.69%										
12		Inversiones (Caja)											
13													
14		Depósitos	59,974,107.76										
15		Saldo Inicial											
16		Intereses	0.00										
17		Disposición de Principal	59,974,107.76										
18		Disposición Total	59,974,107.76										
19		Saldo final											

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".
Financiamiento IPA CON ESTABILIZACIÓN DE LOS LODOS CON CAL.

Ident	Concepto	Años									
		Totales (USD)	14	15	16	17	18	19	20		
1	Disposiciones	346,696,892.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	Saldo inicial	-29,307,519.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	Intereses	260,401,277.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	Witholding Tax	2,630,315.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	Principal	346,696,892.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	Pago Total	609,728,485.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	Saldo Final		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	Comisiones	6,340,544.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9											
10	Costo All-in	14.69%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11											
12	Inversiones (Caja)										
13											
14	Depósitos	59,974,107.76	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	Saldo inicial		-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	Intereses	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	Disposición de Principal	59,974,107.76	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	Disposición Total	59,974,107.76	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	Saldo final		-	-	-	-	-	-	-	-	-

10.3.1.5. Estado de Resultados.

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".
Estado de Resultados TPA con ESTABILIZACIÓN DE LOS LODOS CON CAL.

AÑOS

Ident	Concepto	Años							
		2	3	4	5	6	7	8	
	Totales (USD)								
1	Ingresos								
2	Tratamiento de aguas	2,506,200,894.57	115,183,347.84	116,911,098.05	118,664,764.53	120,444,736.00	122,291,407.04	124,085,178.14	125,945,455.81
3	Total de Ingresos	2,506,200,894.57	115,183,347.84	116,911,098.06	118,664,764.53	120,444,736.00	122,291,407.04	124,085,178.14	125,945,455.81
4									
5	Gastos Operativos								
6	Operación y Mantenimiento	707,342,108.00	37,228,532.00	37,228,532.00	37,228,532.00	37,228,532.00	37,228,532.00	37,228,532.00	37,228,532.00
7	Administración	526,302,187.86	24,188,503.05	24,551,330.59	24,919,600.55	25,293,384.56	25,672,795.48	26,057,887.41	26,448,755.72
8	Contratación Municipal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	Total Gastos de Operación	1,233,644,295.86	61,417,035.05	61,779,862.59	62,148,132.55	62,521,926.56	62,891,327.48	63,286,419.41	63,677,287.72
10									
11	Utilidad Bruta	1,272,556,598.71	53,766,312.79	55,131,235.47	56,516,631.98	57,922,809.44	59,350,079.56	60,798,758.73	62,269,168.09
12									
13	Depreciación	257,160,660.01	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58
14									
15	Utilidad de Operación	1,015,395,938.70	40,231,541.21	41,596,463.89	42,981,860.40	44,388,037.86	45,815,307.98	47,263,987.15	48,734,396.51
16									
17	Gastos Financieros	233,767,436.78	41,306,930.16	38,136,658.13	34,933,919.74	31,375,321.51	27,421,323.49	23,027,992.35	18,146,513.31
18	Productos Financieros	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19									
20	Utilidad antes de Impuestos	781,628,501.92	(1,075,388.95)	3,459,805.75	8,047,940.66	13,012,716.34	18,393,984.49	24,235,894.80	30,587,883.20
21									
22	Impuestos								
23	Predial	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	ISR	224,596,235.02	0.00	0.00	0.00	0.00	2,659,401.93	7,270,798.44	9,176,364.96
25	IMPAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26	Total Impuestos	224,596,235.02	0.00	0.00	0.00	0.00	2,659,401.93	7,270,798.44	9,176,364.96
27									
28	Utilidad Neta	557,032,266.90	(1,075,388.95)	3,459,805.75	8,047,940.66	13,012,716.34	15,734,582.56	16,965,196.36	21,411,518.24
29									
30	(Pérdida) o Utilidad Acumulada		(34,049,774.13)	(30,589,968.38)	(22,542,027.72)	(9,529,311.38)	8,884,673.11	33,100,667.91	63,688,551.12
31									
32	Deuda Sostenible								
33	Utilidad Bruta	53,766,312.79	55,131,235.47	56,516,631.98	57,922,809.44	59,350,079.56	60,798,758.73	62,269,168.09	
34	DSCR	53,766,312.79	55,131,235.47	56,516,631.98	57,922,809.44	59,350,079.56	60,798,758.73	62,269,168.09	
35	All-in acumulada	15.00%	30.00%	45.00%	60.00%	75.00%	90.00%	105.00%	
36	VPN	317,389,372.28	46,753,315.47	42,408,642.67	38,976,997.57	36,201,755.90	33,914,331.18	31,989,346.70	30,375,203.95
37	Índice de Cobertura		53,766,312.79	55,131,235.47	56,516,631.98	57,922,809.44	59,350,079.56	60,798,758.73	62,269,168.09
38	Utilidad Bruta		1.30	0.82	0.84	0.86	0.88	0.90	0.92
39	Índice de Cobertura (relación)	0.82	1.30	0.82	0.84	0.86	0.88	0.90	0.92

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".
Estado de Resultados IPA CON ESTABILIZACIÓN DE LOS LODOS CON CAL.

Ident	Concepto	Años										
		9	10	11	12	13	14	15				
	Totales (USD)											
1	Ingresos											
2	Tratamiento de aguas	2,506,200,894.57	129,753,187.44	131,899,485.25	133,674,977.53	135,690,102.19	137,715,303.73	139,761,033.28				
3	Total de Ingresos	2,506,200,894.57	129,753,187.44	131,899,485.25	133,674,977.53	135,690,102.19	137,715,303.73	139,761,033.28				
4												
5	Gastos Operativos											
6	Operación y Mantenimiento	707,342,108.00	37,228,532.00	37,228,532.00	37,228,532.00	37,228,532.00	37,228,532.00	37,228,532.00	37,228,532.00	37,228,532.00	37,228,532.00	37,228,532.00
7	Administración	526,302,187.86	27,248,169.36	27,656,891.90	28,071,745.28	28,492,821.46	28,920,213.78	29,354,016.99				
8	Contraprestación Municipal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	Total Gastos de Operación	1,233,644,295.86	64,476,701.36	64,885,423.90	65,300,277.28	65,721,353.46	66,148,745.78	66,582,548.99				
10												
11	Utilidad Bruta	1,272,556,598.71	63,761,633.59	66,814,061.35	68,374,700.25	69,958,748.73	71,566,557.94	73,198,484.29				
12	Depreciación	257,160,660.01	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58
13												
14	Utilidad de Operación	1,015,395,938.70	51,741,714.50	53,279,289.77	54,839,928.67	56,423,977.15	58,031,786.37	59,663,712.71				
15												
16	Gastos Financieros	233,767,436.78	6,696,130.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	Productos Financieros	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18												
19	Utilidad antes de impuestos	781,628,501.92	45,045,584.13	53,279,289.77	54,839,928.67	56,423,977.15	58,031,786.37	59,663,712.71				
20												
21	Impuestos											
22	Predial	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	ISR	224,596,235.02	11,251,264.29	15,983,786.93	16,451,978.60	16,927,193.15	17,409,535.91	17,899,113.81				
24	IMPAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25												
26	Total Impuestos	224,596,235.02	11,251,264.29	15,983,786.93	16,451,978.60	16,927,193.15	17,409,535.91	17,899,113.81				
27												
28	Utilidad Neta	557,032,266.90	31,531,908.89	37,295,502.84	38,387,950.07	39,496,784.01	40,622,250.46	41,764,598.90				
29												
30	(Pérdida) o Utilidad Acumulada	101,192,765.42	146,238,349.55	199,517,639.32	254,357,567.99	310,781,545.15	368,813,331.51	428,477,044.23				
31												
32	Deuda Sostenible											
33	Utilidad Bruta	63,761,633.59	65,276,486.08									
34	DSCR	63,761,633.59	65,276,486.08									
35	All-in acumulada	15.00%	135.00%									
36	VPN	317,369,372.28	27,777,228.12									
37	Índice de Cobertura											
38	Utilidad Bruta	63,761,633.59	65,276,486.08									
39	Índice de Cobertura (relación)	0.94	0.97									

ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONOMICA DEL TRATAMIENTO DE Lodos PRODUCCIDOS POR LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGU A RESIDUAL "TEXCOCO NORTE" (ESTUDIO PROSPECTIVO).

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte"
 TPA CON ESTABILIZADOR DE Lodos CON CAL.

Años

Ident	Concepto	Totales (USD)	16	17	18	19	20
1	Ingresos						
2	Tratamiento de aguas	2,506,200,894.57	141,877,748.78	144,005,915.01	146,166,003.74	148,358,493.80	146,166,003.74
3	Total de Ingresos	2,506,200,894.57	141,877,748.78	144,005,915.01	146,166,003.74	148,358,493.80	146,166,003.74
4							
5	Gastos Operativos						
6	Operación y Mantenimiento	707,342,108.00	37,228,532.00	37,228,532.00	37,228,532.00	37,228,532.00	37,228,532.00
7	Administración	526,302,187.86	29,794,327.24	30,241,242.15	30,694,860.79	31,155,283.70	30,694,860.79
8	Contratación Municipal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	Total Gastos de Operación	1,233,644,295.86	67,022,859.24	67,469,774.15	67,923,392.79	68,383,815.70	67,923,392.79
10							
11	Utilidad Bruta	1,272,556,598.71	74,854,889.54	76,536,140.86	78,242,610.95	79,974,678.10	78,242,610.95
12							
13	Depreciación	257,160,660.01	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58
14							
15	Utilidad de Operación	1,015,395,938.70	61,320,117.96	63,001,369.28	64,707,839.37	66,439,906.52	64,707,839.37
16							
17	Gastos Financieros	233,767,436.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	Productos Financieros	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19							
20	Utilidad antes de Impuestos	781,628,501.92	61,320,117.96	63,001,369.28	64,707,839.37	66,439,906.52	64,707,839.37
21							
22	Impuestos						
23	Predial	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	ISR	224,596,235.02	18,396,035.39	18,900,410.78	19,412,351.81	19,931,971.96	19,412,351.81
25	MPAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26	Total Impuestos	224,596,235.02	18,396,035.39	18,900,410.78	19,412,351.81	19,931,971.96	19,412,351.81
27							
28	Utilidad Neta	557,032,266.90	42,924,082.57	44,100,958.50	45,295,487.56	46,507,934.56	45,295,487.56
29							
30	(Pérdida) o Utilidad Acumulada		489,797,162.18	552,798,531.47	617,506,370.84	683,946,277.36	748,654,116.74
31							
32	Deuda Sostenible						
33	Utilidad Bruta						
34	DSCR						
35	All-in acumulada						
36	VPN	317,389,372.28					
37	Índice de Cobertura	15.00%					
38	Utilidad Bruta						
39	Índice de Cobertura (relación)	0.82					

10.3.1.6. Origenes y Aplicaciones.

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".

Origenes y Aplicaciones TPA, CON ESTABILIZACION DE LOS LODOS CON CAL.

Años

Ident	Concepto	Totales (USD)																
		1	2	3	4	5	6	7										
		Construcción			Operación													
1	Origenes																	
2	Utilidad Neta	524,057,881.72	(32,974,385.18)	3,459,805.75	8,047,940.66	13,012,716.34	15,734,582.56	16,965,196.36										
3	Depreciación	257,160,660.01	0.00	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58										
4	Disposiciones de Crédito	346,696,892.13	270,946,483.23	75,750,408.90	0.00	0.00	0.00	0.00										
5	Retiros de Caja	59,974,107.76	0.00	59,974,107.76	0.00	0.00	0.00	0.00										
6	Capital	359,774,251.39	33,024,385.19	0.00	40,356,910.07	38,971,513.56	37,565,336.10	38,797,467.91	41,960,185.24									
7	Total Origenes	1,547,663,793.01	270,996,483.23	148,183,899.30	57,351,487.40	60,554,225.80	64,112,824.02	68,066,822.04	72,460,153.18									
8																		
9	Aplicaciones																	
10	Construcción	766,879,881.40	237,721,046.40	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00									
11	Planta de bombeo y tubería a presión	2,616,024.00	2,616,024.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00									
12	Colectores de las márgenes izquierda y derecha	6,771,496.00	6,771,496.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00									
13	Pretratamiento	9,073,152.00	9,073,152.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00									
14	Sedimentador del Tratamiento Primario Avanzado	301,873,626.00	23,930,720.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00									
15	Filtración	98,872,918.00	61,688,872.00	9,847,288.00	9,847,288.00	9,847,288.00	9,847,288.00	9,847,288.00	9,847,288.00									
16	Claración	109,422,640.00	7,090,732.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00									
17	Espesador	17,189,346.00	7,090,732.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00									
18	Estabilización con cal apagada	57,774,329.00	3,520,000.00	2,855,491.00	2,855,491.00	2,855,491.00	2,855,491.00	2,855,491.00	2,855,491.00									
19	Filtros Banda	97,631,472.00	37,338,620.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00									
20	Costo de terreno	1,730,159.00	1,730,159.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00									
21	Cimentaciones	20,000,000.00	20,000,000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00									
22	Edificios	14,523,809.00	14,523,809.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00									
23	Imponderables	157,510,595.40	39,620,174.40	6,204,759.00	6,204,759.00	6,204,759.00	6,204,759.00	6,204,759.00	6,204,759.00									
24	Gastos Financieros Construcción	32,974,385.18	32,974,385.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00									
25	Amortización del Crédito	346,696,892.13	0.00	29,115,803.63	32,350,892.92	35,945,436.58	39,939,373.98	44,377,082.20	48,366,015.98									
26	Withholding Tax	2,630,315.94	301,051.65	385,218.77	385,218.77	385,218.77	385,218.77	385,218.77	385,218.77									
27	Depósitos a Caja	59,974,107.76	0.00	59,974,107.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00									
28	Pago de Dividendos	338,508,210.59	0.00	59,974,107.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00									
29	Total Aplicaciones	1,547,663,793.01	270,996,483.23	148,183,899.30	57,351,487.40	60,554,225.80	64,112,824.02	68,066,822.04	72,460,153.18									
30																		
31	Origenes vs. Aplicaciones	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00									
32																		
33	TIR DEL NEGOCIO																	
34	Utilidad Neta		(32,974,385.18)	(1,075,388.95)	8,047,940.66	13,012,716.34	15,734,582.56	16,965,196.36										
35	Depreciación		0.00	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58										
36	Gastos Financieros		32,974,385.18	41,306,930.16	38,136,658.13	34,933,919.74	31,375,321.51	27,421,323.49	23,027,992.35									
37	Inversiones		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00									
38	Flujo Operativo		(65,948,770.37)	(55,917,090.69)	(48,211,623.96)	(40,420,750.65)	(31,897,376.75)	(25,221,512.51)	(19,597,567.57)									
39	TIR																	
40	Indice de rentabilidad (relación)																	

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".
Origenes y Aplicaciones TPA CON ESTABILIZACION DE LOS Lodos CON CAL

Ident	Concepto	Años												
		3	9	10	11	12	13	14						
Totales (USD)														
1	Origenes													
2	Utilidad Neta	524,057,881.72	21,411,518.24	26,252,950.01	31,531,908.89	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	
3	Depreciación	257,160,660.01	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	
4	Disposiciones de Crédito	346,696,892.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
5	Retiros de Caja	59,974,107.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
6	Capital	359,774,251.39	42,395,342.40	42,977,778.23	43,725,334.69	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
7	Total Origenes	1,547,663,793.01	77,341,632.22	82,765,497.83	88,792,015.16	50,830,274.42	51,922,721.65	53,031,555.59	54,157,022.03					
8	Aplicaciones													
9	Construcción	766,879,881.40	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	
10	Planta de bombeo y tubería a presión	2,616,624.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
11	Colectores de las márgenes izquierda y derecha	6,771,486.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
12	Pretratamiento	59,146,740.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	
13	Sedimentador del Tratamiento Primario Avanzado	301,673,628.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	
14	Filtración	98,672,918.00	1,968,634.00	1,968,634.00	1,968,634.00	1,968,634.00	1,968,634.00	1,968,634.00	1,968,634.00	1,968,634.00	1,968,634.00	1,968,634.00	1,968,634.00	
15	Cloración	109,422,540.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00	
16	Espeador	17,169,346.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	
17	Estabilización con cal apagada	57,774,328.00	2,855,491.00	2,855,491.00	2,855,491.00	2,855,491.00	2,855,491.00	2,855,491.00	2,855,491.00	2,855,491.00	2,855,491.00	2,855,491.00	2,855,491.00	
18	Filtros Banda	97,631,472.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	
19	Costo de terreno	1,730,159.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
20	Comerciales	20,000,000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
21	Edificios	14,523,809.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
22	Impponderables	157,510,595.40	6,204,759.00	6,204,759.00	6,204,759.00	6,204,759.00	6,204,759.00	6,204,759.00	6,204,759.00	6,204,759.00	6,204,759.00	6,204,759.00	6,204,759.00	
23	Gastos Financieros Construcción	32,974,385.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
24	Amortización del Crédito	346,696,892.13	49,307,869.11	54,786,521.23	60,873,912.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
25	Withholding Tax	2,630,315.94	183,298.11	128,511.59	67,637.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
26	Depósitos a Caja	59,974,107.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
27	Pago de Dividendos	338,508,210.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
28	Total Aplicaciones	1,547,663,793.01	77,341,632.22	82,765,497.83	88,792,015.16	50,830,274.42	51,922,721.65	53,031,555.59	54,157,022.03					
29	Origenes vs. Aplicaciones	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
30														
31	TIR DEL NEGOCIO													
32	Utilidad Neta	21,411,518.24	26,252,950.01	31,531,908.89	37,295,502.84	38,387,950.07	39,496,784.01	40,622,250.48						
33	Depreciación	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58						
34	Gastos Financieros	18,146,513.31	12,722,647.71	6,696,130.37	0.00	0.00	0.00	0.00						
35	Inversiones	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00						
36	Flujo Operativo	(10,269,766.65)	(4,469.27)	11,301,006.94	23,760,731.26	24,853,178.49	25,962,012.43	27,087,478.88						
37	TIR	0.00%												
38	Indice de rentabilidad (relación)	1.000522372												
39														
40														





Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".
Origenes y Aplicaciones: TPA CON ESTABILIZACION DE LOS Lodos CON CAL.

Ident	Concepto	Años							
		15	16	17	18	19	20		
	Totales (USD)								
1	Origenes								
2	Utilidad Neta	524,057,881.72	42,924,082.57	44,100,958.50	45,295,487.56	46,507,934.56	45,295,487.56	45,295,487.56	45,295,487.56
3	Depreciación	257,160,860.01	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58
4	Disposiciones de Crédito	346,696,892.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	Retiros de Caja	59,974,107.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	Capital	359,774,251.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	Total Origenes	1,547,663,793.01	55,299,370.48	57,635,730.08	58,830,259.14	60,042,706.14	60,042,706.14	58,830,259.14	58,830,259.14
8									
9	Aplicaciones								
10	Construcción	766,879,891.40	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00	27,850,465.00
11	Planta de bombeo y tubería a presión	2,616,024.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	Colectores de las márgenes izquierda y derecha	6,771,495.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13	Pretratamiento	59,146,740.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00
14	Sedimentador del Tratamiento Primario Avanzado	301,873,826.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00
15	Filtración	96,672,918.00	1,958,634.00	1,958,634.00	1,958,634.00	1,958,634.00	1,958,634.00	1,958,634.00	1,958,634.00
16	Cloración	108,422,640.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00
17	Espesador	17,189,346.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00
18	Estabilización con cal apagada	57,774,329.00	2,855,491.00	2,855,491.00	2,855,491.00	2,855,491.00	2,855,491.00	2,855,491.00	2,855,491.00
19	Filtros Banda	97,631,472.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00
20	Costo de terreno	1,730,159.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	Cimentaciones	20,000,000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22	Edificios	14,523,809.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	Imponderables	157,510,595.40	6,204,759.00	6,204,759.00	6,204,759.00	6,204,759.00	6,204,759.00	6,204,759.00	6,204,759.00
24	Gastos Financieros Construcción	32,974,385.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25	Amortización del Crédito	346,696,892.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26	Withholding Tax	2,630,315.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27	Depósitos a Caja	59,974,107.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28	Pago de Dividendos	338,508,210.59	27,448,905.48	28,608,389.15	29,785,265.08	30,979,794.14	32,192,241.14	30,979,794.14	30,979,794.14
29	Total Aplicaciones	1,547,663,793.01	55,299,370.48	57,635,730.08	58,830,259.14	60,042,706.14	60,042,706.14	58,830,259.14	58,830,259.14
30									
31	Origenes vs. Aplicaciones	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
32									
33	TIR DEL NEGOCIO								
34	Utilidad Neta	41,764,598.90	42,924,082.57	44,100,958.50	45,295,487.56	46,507,934.56	45,295,487.56	45,295,487.56	45,295,487.56
35	Depreciación	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58	13,534,771.58
36	Gastos Financieros	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
37	Inversiones	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
38	Flujo Operativo	28,229,827.32	29,389,310.99	30,566,186.92	31,760,715.98	32,973,162.98	31,760,715.98	31,760,715.98	31,760,715.98
39	TIR	0.00%							
40	Indice de rentabilidad (relación)	1.000522372							

10.3.2. Tratamiento Primario Avanzado con Digestión Anaerobia de los lodos.

10.3.2.1. Premisas.

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".
Premisas TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO CON DIGESTION ANAEROBIA DE LODOS.





-  Calculado en esta hoja
-  Proviene de esta misma hoja
-  Proviene de otra hoja
-  Dato

Ident	Tipo	Concepto	Nota	Nota
1		Proyecto		
2		Concesión	años	20 1 años Const
3		Costo	USD	294,349,728.97
4		Ingresos		
5		Total de Agua Residual	44 m ³ /s	1,387,584,000 m ³ trat/año
6		Tarifas por m ³	USD por m ³ tratado	0.08674
7		Gastos Operativos (anuales)		
8		Operación y Mantenimiento	anuales	36,453,232.00
9		Administración	% sobre ingresos brutos	21.00%
10		Presupuesto		
11		Planta bombeo y tubería presión	Costo Total	2,616,024.00 % 0.89%
12		Colectores márgenes izq. y der.	Costo Total	6,771,496.00 % 2.30%
13		Pretratamiento	Costo Total	9,073,152.00 % 3.08%
14		Sedimentador del TPA	Costo Total	23,930,720.00 % 8.13%
15		Filtración	Costo Total	61,658,872.00 % 20.95%
16		Cloración	Costo Total	9,847,288.00 % 3.35%
17		Espesador	Costo Total	7,090,732.00 % 2.41%
18		Digestor Anaerobio de lodos	Costo Total	22,500,000.00 % 7.64%
19		Filtros Banda para lodos biológicos	Costo Total	27,701,600.00 % 9.41%
20		Costo del terreno	Costo Total	1,730,159.00 % 0.59%
21		Cimentaciones	Costo Total	28,000,000.00 % 9.51%
22		Edificios	Costo Total	14,523,809.00 % 4.93%
23		Parcial	Costo Total	215,443,852.00 % ACUM 73.19%
24		Imponderables (20%)	Costo Total	43,088,770.40 % 14.64%
25		Total (sin IVA e intereses)	Costo Total	258,532,622.40 % ACUM 87.83%
26		IVA (15% incluido)	Costo Total	0.00 % 0.00%
27		Intereses Durante Construcción	Costo Total	35,817,106.57 % 12.17%
28		Total	Costo Total	294,349,728.97 % ACUM 100.00%
27		Contraprestación	% sobre ingresos brutos	0.00%

(CAPDET, Hydromantys, Inc)

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".

Premisas TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO CON DIGESTION ANAEROBIA DE LODOS.

-  Calculado en esta hoja
-  Proviene de esta misma hoja
-  Proviene de otra hoja
-  Dato

Ident	Tipo	Concepto	Nota		Nota
29		Financieras			
30		Estructura Financiera			
31		Capital		0.00	% 0.00%
32		Créditos		258,532,622.40	% 100.00%
33		Total		258,532,622.40	% ACUM 100.00%
34		Financiamiento •			
35		Plazo del Crédito	años	10	
36		Gracia Pago de Principal	años	2	
37		Tasa de Interés Crédito	Durante Construcción	11.11%	11.00%
38		Base	Basado en Cupón de Eurobono	9.25%	
39		Spread		1.75%	
40		Up-Front Fee	Comisión de Apertura	0.90%	
41		Commitment Fee	Comisión de Compromiso	0.00%	
42		Exposure Fee	Prima de Riesgos	0.00%	
43		Otros Gastos	Estimado	50,000	
44		Rendimiento de Inversiones	Supuesto Anual	5.50%	
45		Fiscales			
46		Withholding Tax	%	1.00%	
47		Depreciación del Inmueble	% anual	5.00%	
48		Impuesto Predial	% anual	0.00%	
49		IVA (15% incluido)	%	0.00%	
50		ISR	% anual	30.00%	
51		IMPAC	% anual	2.00%	
52		Transporte			
54		Producción de lodos	anual (ton/año)	780,293.35	
55		Bombeo	costo anual (\$USDm ³ anual/km) ••	60,082.59	0.077 C.U.(\$USDm ³ /Km)
56		Carretero	costo anual (\$USDm ³ anual/km) •••	487,683.34	0.625 C.U.(\$USDm ³ /Km)
57		Férreo	costo anual (\$USDtonanual/km) ••••	78,029.34	0.100 C.U.(\$USDton/ Km)

(Banco Interamericano de Desarrollo) •

(Comisión Nacional del Agua) ••

(Ingenieros Civiles Asociados) •••

(Transportación Ferroviaria Mexicana) ••••

ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONOMICA DEL TRATAMIENTO DE LODOS PRODUCIDOS POR LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL "TEXCOCO NORTE" (ESTUDIO PROSPECTIVO).

10.3.2.2. Estimaciones de Ingreso.

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".
Parámetros TPA CON DIGESTION ANAEROBIA DE LODOS.

Ident	Concepto	Nota	Años	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Demanda		(m ³)	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000
2	Demanda anual de tratamiento												
3	Tarifa por m ³ tratado		(USD)	0.08674	0.08804	0.08936	0.09070	0.09206	0.09344	0.09485	0.09627	0.09771	0.09918
4	Ingreso Anual		(USD)	120,359,036.16	122,164,421.70	123,996,898.03	125,856,941.35	127,744,693.97	129,660,864.38	131,605,777.34	133,579,864.00	135,589,561.96	137,617,315.39

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".
Parámetros TPA CON DIGESTION ANAEROBIA DE LODOS.

Ident	Concepto	Nota	Años	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	Demanda		(m ³)	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000	1,387,584,000
2	Demanda anual de tratamiento											
3	Tarifa por m ³ tratado		(USD)	0.10067	0.10218	0.10371	0.10526	0.10684	0.10845	0.11007	0.11172	0.11340
4	Ingreso Anual		(USD)	139,681,575.12	141,776,798.75	143,903,450.73	146,062,002.49	148,252,932.53	150,476,728.52	152,733,897.42	155,024,885.58	157,350,258.86

10.3.2.3. Estimaciones de Operación y Construcción.

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".
Programa TPA CON DIGESTION ANAEROBIA DE LODOS.

Años

Ident	Concepto	Totales (USD)	
1	Planta de bombeo y tubería a presión	2,616,024.00	0.00
2	Colectores de las márgenes izquierda y derecha	6,771,496.00	0.00
3	Pretratamiento	11,708,604.00	2,635,452.00
4	Sedimentador del Tratamiento Primario Avanzado	38,559,294.00	14,628,574.00
5	Filtración	63,617,506.00	1,958,634.00
6	Cloración	15,088,096.00	5,240,808.00
7	Espesador	7,622,238.00	531,506.00
8	Digestor Anaerobio de lodos	24,709,408.00	2,209,408.00
9	Filtros Banda para lodos biológicos	30,874,908.00	3,173,308.00
10	Costo de terreno	1,730,159.00	0.00
11	Cimentaciones	20,000,000.00	0.00
12	Edificios	12,142,857.00	0.00
13	Imponderables	43,215,198.40	6,075,542.00
14	IVA	0.00	0.00
15	Transporte		
16	Total	258,532,622.40	36,453,232.00
17			
18	Gastos Financieros Construcción	35,817,106.57	35,817,106.57

(CAPDET, Hydromantys, Inc)

ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONÓMICA DEL TRATAMIENTO DE LODOS PRODUCIDOS POR LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL "TEXCOCO NORTE" (ESTUDIO PROSPECTIVO).

10.3.2.4. Estimaciones de Crédito.

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".
Financiamiento TPA CON DIGESTION ANAEROBIA DE LODOS.

Ident	Tipo	Totales (USD)							
		Años							
		1	2	3	4	5	6	7	
1	Disposiciones	372,520,976.93	250,518,601.90	294,620,975.09	77,844,451.66	0.00	0.00	0.00	0.00
2	Saldo Inicial		-122,002,375.03	294,676,525.27	372,520,976.93	341,236,451.86	306,475,868.45	267,852,998.00	224,938,697.50
3	Intereses	280,187,856.31		294,676,525.27	40,977,307.46	37,536,009.70	33,712,345.53	29,463,829.78	24,743,256.72
4	Witholding Tax	2,830,180.37	32,414,417.78	32,414,417.78	413,912.20	379,151.61	340,528.74	297,614.44	249,931.89
5	Principal	372,520,976.93	0.00	0.00	413,912.20	31,284,525.07	38,622,870.45	42,914,300.50	47,682,556.11
6	Pago Total	655,539,013.60	0.00	32,741,836.14	41,391,219.86	72,675,744.73	72,675,744.73	72,675,744.73	72,675,744.73
7	Saldo Final		294,676,525.27	294,676,525.27	372,520,976.93	341,236,451.86	306,475,868.45	267,852,998.00	224,938,697.50
8	Comisiones	6,805,377.58	3,402,688.79	3,402,688.79	3,402,688.79	0.00	0.00	0.00	0.00
9	Costo Alíen		14.68%	-258,532,000.34	-33,050,543.21	72,675,744.73	72,675,744.73	72,675,744.73	72,675,744.73
10	Inversiones (Caja)								
11									
12									
13	Depósitos		64,476,567.77		64,476,567.77				
14	Saldo Inicial				64,476,567.77				
15	Intereses		0.00						
16	Disposición de Principal		64,476,567.77		64,476,567.77				
17	Disposición Total		64,476,567.77		64,476,567.77				
18	Saldo final								
19									

**Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".
Financiamiento TPA CON DIGESTION ANAEROBIA DE LODOS.**

Ident	Tipo	Concepto	Años													
			8	9	10	11	12	13	14							
		Totales (USD)														
1		Deposiciones	372,520,976.93	250,518,601.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
2		Saldo inicial		-122,002,375.03	177,256,141.39	124,275,523.48	65,408,170.25	7,194,898.73	72,675.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
3		Intereses	280,187,856.31	19,496,175.55	13,970,307.58	138,083.91	72,675.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
4		Witholding Tax	2,830,180.37	196,961.27	58,867,353.23	65,408,170.25	72,675.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
5		Principal	372,520,976.93	72,675,744.73	72,675,744.73	72,675,744.73	72,675,744.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
6		Pago Total	655,539,013.60	124,275,523.48	65,408,170.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
7		Saldo Final														
8		Comisiones	6,805,377.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
9																
10		Costo All-in		14.68%	72,675,744.73	72,675,744.73	72,675,744.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
11																
12		Inversiones (Caja)														
13																
14		Depósitos	64,476,567.77													
15		Saldo inicial														
16		Intereses		0.00												
17		Disposición de Principal	64,476,567.77													
18		Disposición Total	64,476,567.77													
19		Saldo final														

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".
Financiamiento TPA CON DIGESTION ANAEROBIA DE LÓDOS.

Ident	Tipo	Concepto	Totales (USD)	Años						
				15	16	17	18	19	20	
1		Disposiciones	372,520,976.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
2		Saldo Inicial	250,518,601.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
3		Intereses	-122,002,375.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
4		Witholding Tax	280,187,856.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
5		Principal	2,830,180.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
6		Pago Total	372,520,976.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
7		Saldo Final	655,539,013.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
8		Comisiones	6,805,377.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
9		Costo Al-In	14.68%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
10		Inversiones (Caja)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
11										
12										
13										
14		Depósitos	64,476,567.77	-	-	-	-	-	-	
15		Saldo Inicial	0.00	-	-	-	-	-	-	
16		Intereses	64,476,567.77	-	-	-	-	-	-	
17		Disposición de Principal	64,476,567.77	-	-	-	-	-	-	
18		Disposición Total	64,476,567.77	-	-	-	-	-	-	
19		Saldo Final		-	-	-	-	-	-	

10.3.2.5. Estado de Resultados.

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte"
Estado de Resultados- IPA CON DIGESTION ANAEROBIA DE LODOS.

Años

Ident	Concepto	2	3	4	5	6	7	8
	Totales (USD)							
1	Ingresos							
2	Tratamiento de aguas	2,618,815,390.85	122,184,421.70	123,996,888.03	125,856,841.35	127,744,693.97	129,660,864.38	131,605,777.24
3	Total de Ingresos	2,618,815,390.85	122,184,421.70	123,996,888.03	125,856,841.35	127,744,693.97	129,660,864.38	131,605,777.24
4								
5	Gastos Operativos							
6	Operación y Mantenimiento	692,611,408.00	36,453,232.00	36,453,232.00	36,453,232.00	36,453,232.00	36,453,232.00	36,453,232.00
7	Administración	549,951,232.08	25,654,528.56	26,039,346.49	26,429,936.58	26,826,385.73	27,228,781.52	27,637,213.24
8	Contratación Municipal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	Total Gastos de Operación	1,242,562,640.08	62,107,760.56	62,492,578.49	62,883,168.68	63,279,617.73	63,662,013.52	64,090,445.24
10								
11	Utilidad Bruta	1,376,252,750.77	60,056,661.14	61,504,309.54	62,973,672.67	64,465,076.24	65,978,850.86	67,515,332.10
12								
13	Depreciación	279,632,242.52	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45
14								
15	Utilidad de Operación	1,096,620,508.25	45,339,174.70	46,786,823.09	48,256,186.22	49,747,589.79	51,261,364.41	52,797,845.65
16								
17	Gastos Financieros	251,176,127.32	44,379,996.25	37,536,009.70	33,712,345.53	29,463,829.78	24,743,256.72	19,498,175.55
18	Productos Financieros	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19								
20	Utilidad antes de Impuestos	845,444,380.93	4,361,867.23	9,250,813.39	14,543,840.69	20,283,760.01	26,518,107.69	33,299,670.10
21								
22	Impuestos							
23	Predial	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24	ISR	242,888,182.31	0.00	0.00	0.00	3,646,829.58	7,955,432.31	9,989,901.03
25	IMPAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26	Total Impuestos	242,888,182.31	0.00	0.00	0.00	3,646,829.58	7,955,432.31	9,989,901.03
27								
28	Utilidad Neta	602,556,198.62	4,361,867.23	9,250,813.39	14,543,840.69	16,636,930.42	18,562,675.38	23,309,769.07
29								
30	(Pérdida) o Utilidad Acumulada		(36,284,182.71)	(31,922,315.47)	(22,671,502.09)	(8,127,661.40)	12,156,066.61	38,674,206.29
31								
32	Deuda Sostenible							
33	Utilidad Bruta	58,630,406.57	60,056,661.14	61,504,309.54	62,973,672.67	64,465,076.24	65,978,850.86	67,515,332.10
34	DSCR	15.00%	30.00%	45.00%	60.00%	75.00%	90.00%	105.00%
35	All-in acumulada							
36	VPN	250,518,601.90	46,197,431.65	42,416,765.20	39,358,545.42	36,837,186.42	34,725,710.98	32,934,308.34
37	Índice de Cobertura							
38	Utilidad Bruta	0.83	0.83	0.85	0.87	0.89	0.91	0.93
39	Índice de Cobertura (relación)							

ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICO ECONOMICA DEL TRATAMIENTO DE Lodos PRODUCIDOS POR LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL "TEXCOCO NORTE" (ESTUDIO PROSPECTIVO).

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".
Estado de Resultados TPA CON DIGESTION ANAEROBIA DE Lodos.

Años

Ident	Concepto	Totales (USD)	9	10	11	12	13	14	15
1	Ingresos	2,818,815,390.85	133,379,864.00	135,593,561.96	137,817,315.59	139,691,575.12	141,778,798.75	143,903,450.73	146,062,002.49
2	Tratamiento de aguas								
3	Total de Ingresos	2,818,815,390.85	133,379,864.00	135,593,561.96	137,817,315.59	139,691,575.12	141,778,798.75	143,903,450.73	146,062,002.49
4									
5	Gastos Operativos	692,611,408.00	36,453,232.00	36,453,232.00	36,453,232.00	36,453,232.00	36,453,232.00	36,453,232.00	36,453,232.00
6	Operación y Mantenimiento	549,951,232.08	28,051,771.44	28,472,548.01	28,899,656.23	29,333,136.78	29,773,127.74	30,219,724.65	30,677,020.52
7	Administración	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	Contraprestación Municipal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	Total Gastos de Operación	1,242,562,640.08	64,505,003.44	64,925,780.01	65,352,868.23	65,786,362.78	66,226,359.74	66,672,956.65	67,126,252.52
10									
11	Utilidad Bruta	1,376,252,750.77	69,074,860.56	70,657,781.95	72,294,447.16	73,895,212.35	75,550,439.01	77,230,494.08	78,935,749.97
12									
13	Depreciación	279,632,242.52	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45
14									
15	Utilidad de Operación	1,096,620,508.25	54,357,374.11	55,940,295.50	57,546,960.71	59,177,725.90	60,832,952.56	62,513,007.63	64,218,263.52
16									
17	Gastos Financieros	251,176,127.32	13,670,307.58	7,194,898.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	Productos Financieros	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19									
20	Utilidad antes de Impuestos	845,444,380.93	40,687,066.53	48,745,396.78	57,546,960.71	59,177,725.90	60,832,952.56	62,513,007.63	64,218,263.52
21	Impuestos								
22	Precial	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	ISR	242,888,182.31	12,206,119.96	14,623,619.03	17,284,088.21	17,753,317.77	18,249,885.77	18,753,902.29	19,265,479.06
24	IMPAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25	Total Impuestos	242,888,182.31	12,206,119.96	14,623,619.03	17,284,088.21	17,753,317.77	18,249,885.77	18,753,902.29	19,265,479.06
26									
27	Utilidad Neta	602,556,198.62	28,480,946.57	34,121,777.74	40,262,872.50	41,424,408.13	42,583,066.80	43,759,105.34	44,952,784.46
28									
29									
30	(Patencial) o Utilidad Acumulada		112,650,942.92	161,405,339.70	218,953,330.41	278,131,026.31	338,963,978.68	401,476,986.51	465,655,250.03
31									
32	Deuda Sostenible		69,074,860.56	70,657,781.95					
33	Utilidad Bruta		69,074,860.56	70,657,781.95					
34	DSCR		120.00%	135.00%					
35	All-in acumulada	250,518,601.90	31,397,663.89	30,067,141.26					
36	VPN								
37	Índice de Cobertura		69.074,860.56	70,657,781.95					
38	Utilidad Bruta		0.95						
39	Índice de Cobertura (relación)			0.97					

**Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".
Estado de Resultados TPA CON DIGESTION ANAEROBIA DE LODOS.**

Ident	Tipo	Concepto	Años					
			16	17	18	19	20	
		Totales (USD)						
1		Ingresos						
2		Tratamiento de aguas	2,618,815,390.85	150,476,726.52	152,733,877.42	155,024,885.58	152,733,877.42	
3		Total de Ingresos	2,618,815,390.85	150,476,726.52	152,733,877.42	155,024,885.58	152,733,877.42	
4		Gastos Operativos						
5		Operación y Mantenimiento	36,453,232.00	36,453,232.00	36,453,232.00	36,453,232.00	36,453,232.00	
6		Administración	31,133,115.83	31,600,112.57	32,074,114.26	32,555,225.97	32,074,114.26	
7		Contraprestación Municipal	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
8		Total Gastos de Operación	67,586,347.83	68,053,344.57	68,527,346.26	69,008,457.97	68,527,346.26	
9		Utilidad Bruta	1,376,252,750.77	80,666,584.70	84,206,531.16	86,016,427.61	84,206,531.16	
10		Depreciación	279,632,242.52	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	
11		Utilidad de Operación	1,096,620,508.25	65,949,098.25	69,489,044.71	71,298,941.16	69,489,044.71	
12		Gastos Financieros	251,176,127.32	0.00	0.00	0.00	0.00	
13		Productos Financieros	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
14		Utilidad antes de Impuestos	845,444,380.93	65,949,098.25	69,489,044.71	71,298,941.16	69,489,044.71	
15		Impuestos						
16		Predial	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
17		ISR	242,888,182.31	19,784,729.48	20,311,768.65	20,846,713.41	21,389,682.35	
18		IMPAC	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
19		Total Impuestos	242,888,182.31	19,784,729.48	20,311,768.65	20,846,713.41	21,389,682.35	
20		Utilidad Neta	602,556,198.62	46,164,368.78	47,394,126.85	48,642,331.30	49,909,258.81	
21		(Pérdida) o Utilidad Acumulada		531,644,348.28	599,350,243.78	668,839,288.49	740,138,229.65	
22		Deuda Sostenible						
23		Utilidad Bruta						
24		DSCR						
25		All-in acumulada	15.00%					
26		VPN	250,518,601.90					
27		Índice de Cobertura						
28		Utilidad Bruta						
29		Índice de Cobertura (relación)	0.83					

ANALISIS DE FACTIBILIDAD TECNICO ECONOMICA DEL TRATAMIENTO DE LODOS PRODUCIDOS POR LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL "TEXCOCO NORIE" (ESTUDIO PROSPECTIVO).

Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".
Orígenes y Aplicaciones TPA CON DIGESTION ANAEROBIA DE LODOS.

Concepto	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Orígenes										
Utilidad Neta	566,739,092.05	41,424,408.13	42,583,066.80	43,759,105.34	44,952,784.46	46,164,368.78	47,394,126.85	48,642,331.30	49,909,258.81	48,642,331.30
Depreciación	279,632,242.52	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45
Disposiciones de Crédito	372,520,976.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Retiros de Caja	64,476,567.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Capital	381,054,099.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total Orígenes	1,644,432,378.56	56,141,894.58	57,300,563.24	58,476,591.79	59,670,270.91	60,881,855.22	62,111,613.30	63,359,817.75	64,626,745.26	63,359,817.75
Aplicaciones										
Construcción										
Planta de bombeo y tubería a presión	775,415,880.40	27,204,382.00	27,204,382.00	27,204,382.00	27,204,382.00	27,204,382.00	27,204,382.00	27,204,382.00	27,204,382.00	27,204,382.00
Colectores de las márgenes izquierda y derecha	2,616,024.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pretratamiento	6,771,496.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sedimentador del Tratamiento Primario Avanzado	59,146,740.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00	2,635,452.00
Filtración	301,873,626.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00	14,628,574.00
Cloración	98,872,919.00	1,958,634.00	1,958,634.00	1,958,634.00	1,958,634.00	1,958,634.00	1,958,634.00	1,958,634.00	1,958,634.00	1,958,634.00
Espeador	109,422,640.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00	5,240,808.00
Digestor Anaerobio de lodos	17,189,345.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00	531,506.00
Filtros Banda para lodos biológicos	64,478,752.00	2,209,408.00	2,209,408.00	2,209,408.00	2,209,408.00	2,209,408.00	2,209,408.00	2,209,408.00	2,209,408.00	2,209,408.00
Costo de terreno	87,994,452.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00	3,173,308.00
Cimentaciones	1,790,159.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Edificios	28,000,000.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Imponderables	14,523,803.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Gastos Financieros Construcción	166,524,068.40	6,075,542.00	6,075,542.00	6,075,542.00	6,075,542.00	6,075,542.00	6,075,542.00	6,075,542.00	6,075,542.00	6,075,542.00
Amortización del Crédito	35,817,106.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Witholding Tax	372,520,976.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Depósitos a Caja	2,830,180.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pago de Dividendos	64,476,567.77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total Aplicaciones	393,362,266.52	28,937,512.58	30,096,171.24	31,272,209.79	32,465,888.91	33,677,473.22	34,907,231.30	36,155,435.75	37,422,363.26	36,155,435.75
Orígenes vs. Aplicaciones	1,644,432,378.56	56,141,894.58	57,300,563.24	58,476,591.79	59,670,270.91	60,881,855.22	62,111,613.30	63,359,817.75	64,626,745.26	63,359,817.75
TIR DEL NEGOCIO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Utilidad Neta	40,282,872.50	41,424,408.13	42,583,066.80	43,759,105.34	44,952,784.46	46,164,368.78	47,394,126.85	48,642,331.30	49,909,258.81	48,642,331.30
Depreciación	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45	14,717,486.45
Gastos Financieros	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Inversiones	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Flujo Operativo	25,565,386.05	26,708,921.68	27,865,580.35	29,041,618.89	30,235,298.02	31,448,832.33	32,676,840.40	33,924,844.85	35,191,772.36	33,924,844.85
TIR	0.00%									
Indice de rentabilidad (relación)	1.00035642									

10.3.3. Tabla de Sensibilidades.

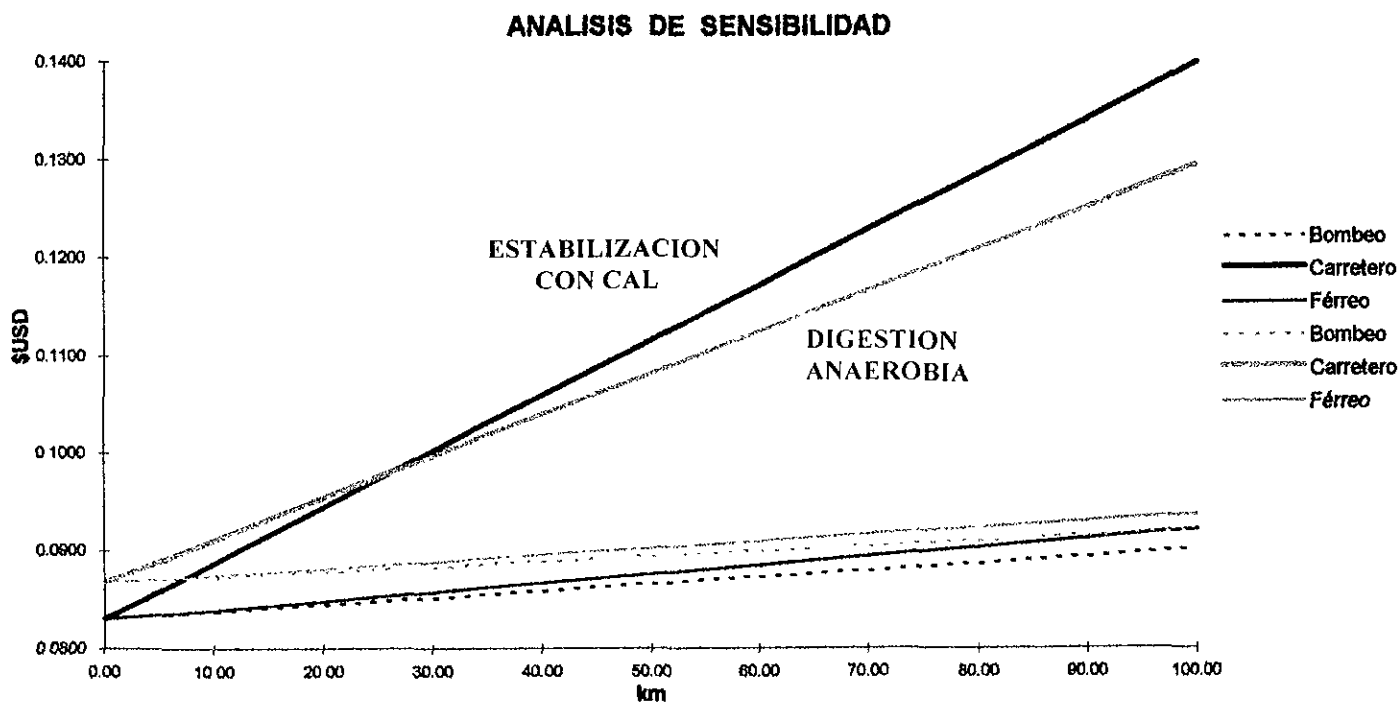
Planta de Tratamiento de Agua Residual "Texcoco Norte".

Sensibilidad TRATAMIENTO PRIMARIO AVANZADO

Concepto

		Variación del precio por m ³ de agua residual tratada.					
kilómetros		Estabilización con cal			Digestión Anaerobia		
		Bombeo	Carretero	Férreo	Bombeo	Carretero	Férreo
0.00		0.08301	0.08301	0.08301	0.08674	0.08674	0.08674
10.00		0.08371	0.08870	0.08392	0.08726	0.09101	0.08743
20.00		0.08441	0.09439	0.08483	0.08778	0.09528	0.08812
30.00		0.08511	0.10008	0.08574	0.08830	0.09955	0.08881
40.00		0.08581	0.10577	0.08665	0.08882	0.10382	0.08950
50.00		0.08651	0.11146	0.08756	0.08934	0.10809	0.09019
60.00		0.08721	0.11715	0.08847	0.08986	0.11236	0.09088
70.00		0.08791	0.12284	0.08938	0.09038	0.11663	0.09157
80.00		0.08861	0.12853	0.09029	0.09090	0.12090	0.09226
90.00		0.08931	0.13422	0.09120	0.09142	0.12517	0.09295
100.00		0.09001	0.13991	0.09211	0.09194	0.12944	0.09364

FIGURA 10.1. GRAFICA DE SENSIBILIDADES.



CAPÍTULO I

CONCLUSIONES

La decisión de la CNA de disponer los lodos estabilizados con cal en el Vaso del ex-Lago de Texcoco pretende la recuperación para fines agrícolas de varios miles de hectáreas de suelos salados y con pH de orden 10. Sin duda, se trata de la selección de la alternativa de tratamiento más adecuada con criterios puramente económicos, aunque técnica y ecológicamente puede no ser factible. A este respecto, trabajos de investigación (Arany, 1956; Kovda, 1980) han demostrado que un mejorador de suelos que tiene como fuente el calcio no debe disponerse en suelos con pH elevados (suelos alcalinos), pues incrementa las condiciones de alcalinidad del suelo que impiden el desarrollo de vida vegetal, y por lo tanto, no contribuye a la solución del problema que significa la presencia sodio, origen de la alta salinidad del suelo. En la bibliografía mundial (Kovda, 1980; Hilgard, 1982; Ortega 1986) se corrobora la inhibición de los macro y micronutrientes, esenciales para un desarrollo vegetal en suelos similares al del ex-Lago de Texcoco (pH superior a 10).

En caso de no modificarse la decisión de tratar los lodos producto del Tratamiento Primario Avanzado mediante la adición de cal y de disponerlos directamente en el Vaso del ex-Lago de Texcoco, se condenaría a esta zona a ser únicamente sitio de almacenamiento de contaminantes, a la desaparición de la capa vegetal (pasto salado) que actualmente lo cubre y ser origen de tolvaneras que provocarían la degradación de la calidad del aire y el incremento de las enfermedades respiratorias en los habitantes de la ZMCM.

Ante tal situación, la aportación de abonos naturales para su incorporación al suelo surge como una alternativa factible, que puede aliviar la carencia de nutrientes esenciales para una vida vegetal diversa y ser método de recuperación de los suelos salinos. Los abonos naturales pueden provenir de distintas fuentes, una de ellas son los lodos generados en los tratamientos de las aguas residuales y estabilizados biológicamente.

La digestión anaerobia es un método alternativo de tratamiento de lodos, cuyo resultado final es un producto con las características físicas, químicas y biológicas recomendadas, pero con condiciones compatibles para el beneficio y no el deterioro del Vaso del ex-Lago de Texcoco.

Por tal motivo, de acuerdo a las características edafológicas del Vaso del ex-Lago de Texcoco, se sugiere la digestión anaerobia para el tratamiento de los lodos generados por el Tratamiento Primario Avanzado (TPA), debido principalmente a que el producto del tratamiento de lodos es materia orgánica con un pH alrededor de la neutralidad, lo que ayudará a la disminución del pH del suelo y a la disposición de micronutrientes necesarios para el crecimiento de especies vegetales. La inversión necesaria para la construcción del TPA y la digestión anaerobia termófila de los lodos, según el análisis financiero, es aproximadamente de \$USD 294,349,728.97 de inversión inicial, con un costo de

operación y mantenimiento anual cercano a \$USD 36,453,232.00 y con un costo para el usuario de \$USD 0.08674/m³ de agua residual tratada. El volumen de lodos estabilizados generado por la digestión anaerobia, según el balance de masa para el tren de tratamiento propuesto, es de 1,920 m³/día con una concentración de sólidos del 22%.

Por otro lado, el TPA con la estabilización de lodos con cal, producirá un volumen de lodos estabilizados, según el balance de masa para el tren de tratamiento propuesto, de 2,588.94 m³/día con una concentración de sólidos del 27%. El análisis financiero comprobó que esta alternativa de tratamiento es la más económica, con una inversión inicial aproximada de \$USD 270,695,431.58, con un costo de operación y mantenimiento anual cercano a \$USD 37,228,532.00 y un costo al usuario de \$USD 0.08301/m³ de agua residual tratada, en el caso de la disposición directa del lodo en el Vaso del ex-Lago de Texcoco. Sin embargo, el costo al usuario aumenta al incluir en la corrida financiera el costo de operación anual relativo al transporte de lodos hacia sitios de disposición donde las características físicas, químicas y biológicas de los mismos sean compatibles con las condiciones particulares del suelo. Esta variación de precios al usuario se presenta de la siguiente manera (distancia del sitio: 100 km): 8.43% para el transporte por bombeo, 68.55% para el transporte carretero y de 10.96% para el transporte férreo.

En primera instancia el precio resultante en el análisis financiero para el TPA y la digestión anaerobia de los lodos se encuentra 4.49% por arriba del precio resultante para el TPA y la estabilización de los lodos con cal. Sin embargo, de acuerdo a la variación de precios al usuario, el costo por m³ de agua residual tratada se iguala para ambos casos cuando los lodos provenientes del TPA y la estabilización de los lodos con cal son transportados 53.29 km por bombeo, 6.56 km por carretera o 40.99 km por tren.

En conclusión, la digestión anaerobia de los lodos provenientes del TPA permite el rescate de una zona que hasta la fecha ha permanecido sin aprovechamiento económico de los habitantes de la región. Por otra parte, a pesar de que la estabilización de los lodos con cal es aparentemente la alternativa más económica, su costo social y ecológico es muy grande ya que eliminaría la capa vegetal que cubre el ex Lago de Texcoco, daría origen a las tolvaneras que provocarían enfermedades respiratorias en los habitantes de la ZMCM y condenaría a miles de hectáreas a ser únicamente sitio de almacenamiento de residuos contaminantes.

BIBLIOGRAFÍA

- Arany, S. (1956)
"Alkali Soils and its Reclamation". Hungría.
- Atlas y Bartha. (1993)
"Microbial Ecology". Cummings Publishing Company.
- Colin, F. (1983)
"Characterization of the Physical State of Sludge". Symposium. Brighton, England.
- Comisión Nacional del Agua (CNA, 1995)
"Estudio de factibilidad del Saneamiento del Valle de México" México.
- Comisión Nacional del Agua (CNA, 1995)
"Estudio del Impacto Ambiental asociado al Proyecto de Saneamiento de las aguas negras que se producen en el Valle de México". México.
- Comisión Nacional del Agua (CNA, 1995)
"Feasibility Study for the Sanitation of the Valley of Mexico" México.
- Cruickshank, G. (1995)
"Proyecto Lago de Texcoco". Comisión Nacional del Agua.
- Christensen, A. (1994)
"Etude de la pollution bacteriologique de la nappe phréatique a partir d' une letrine en Afrique subtropical". Ecole Polytechnique de Lausanne.
- Hall, E. (1992)
"Anaerobic Treatment of Wastewaters in Suspended Growth and Fixed Film Processes". Technomic Publishing Co.
- Instituto de Ingeniería, UNAM. (1995)
"Caracterización y tratabilidad de los lodos producidos en la planta piloto de Ecatepec". México.
- Hilgard, E. (1982)
"Problem of Combating Salinization of Irrigated Soils". Hutchison. Londres.
- Instituto de Ingeniería, UNAM. (1995)
"Estudio de desinfección del agua residual proveniente del Valle de México" México.
- Instituto de Ingeniería, UNAM. (1995)
"Planta de Tratamiento Texcoco" México.

- Kavanaugh, M.C.; Tate, C.H.; Trussell, A.R. y Treweek, G. (1980)
"Use of Particle Size Distribution Measurements for Selection and Control of Solid-Liquid Separation Process". Eds. Advances in Chemistry Series 189. Washington, D.C., U.S.A.
- Kovda, V. (1980)
"Origen and Regime of Saline Soils". Academia de Ciencias. URSS.
- LaGrega, M.D.; Buckingham, P.L. y Evans, J.C. (1990)
"Hazardous Waste Management" ed. McGraw-Hill Book Company. Estados Unidos de América.
- Mascareño, C.F. (1974)
"Estudio preliminar sobre contaminación de suelos y la producción agrícola en el Distrito de Riego 003-Tula, por el uso de aguas negras de la Ciudad de México" Tesis de Maestría. Universidad de Chapingo, México.
- McCarty, P. (1985)
"Historical Trends in the Anaerobic Treatment of Dilute Wastewaters". University of Massachusetts.
- Metcalf, P.A. and Eddy, G.C. (1991)
"Wastewater Engineering" ed. McGraw-Hill Book Company. Estados Unidos de América.
- Mooser, F. (1986)
"Características geológicas y geotécnicas del Valle de México". COVIFUR.
- Morgan, F. (1996)
"Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales Municipales: su potencial de aplicación en México". Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Morgan, J. (1995)
"Tratamiento de Aguas Residuales Municipales para cumplir con la NOM-067-ECOL-1994". Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A. C.
- Ortega, E. (1986)
"Aspectos Teóricos de Carácter Geoquímico, Físico y Químico, involucrados en la génesis de los suelos de salinidad sódica". Universidad Autónoma de Chapingo. México.
- Pohland, F. (1992)
"Anaerobic Treatment: Fundamentals Concepts". Technomic Publishing Co.
- Poulanne, J. (1983)
"Sludge Production Rates". Symposium. Brighton, England.
- Romero, F. (1985)
"Tratamiento Biológico de Aguas Residuales". Fundación Javier Barros Sierra. CONACYT, México.

- Salazar Suárez, C. (1994)
"Costo y Tiempo en Edificación" ed. Limusa S.A. México.
- Samuelson, P. A. y William, D, N. (1994)
"Economy". ed. McGraw-Hill. Estados Unidos de América.
- Stanley Consultans, linc. (1974)
"Quoted in Process Desing Manual for Sludge Treatment and Disposal". EPA 625/1-74-006.
- Siebe, C. y Cifuentes, E. (1994)
"Environmental impact of wastewater irrigation in Central Mexico" International Journal of Environmental Health Research. London, England.
- Syed. R. (1985)
"Wastewater Treatment Plants". CBS College Publishing.
- U.S. Environmental Protection Agency. (1996)
"A guide to the Biosolids Risk Assessments for the EPA Part 503 Rule". Estados Unidos de América.
- U.S. Environmental Protection Agency. (1996)
"A plain English Guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule". Estados Unidos de América.
- Van Haandel, A. C. y Lettinga, G. (1994)
"Anaerobic Sewage Treatment. A practical guide for regions with a hot climate". John Wiley and sons. London, England.
- Vesilind, P.A.; Hartman, G.C. y Skene, E.T. (1986)
"Sludge Management and Disposal for the Practicing Engineer" ed. Lewis Publisher. Estados Unidos de América.
- Water Environmental Federation (1993)
"Sludge Digestion". Estados Unidos de América.
- Zeevaert, L. "Outline of the stratigraphical and mechanical characteristics of the consolidated sedimentary deposits in the basin of the Valley of Mexico". Congreso INQUIA (1953).