

80



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**FILTROS PERCOLADORES EN EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
MUNICIPALES**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
I N G E N I E R O C I V I L
P R E S E N T A :
ANTONIO A. MARTÍNEZ RAMÍREZ

DIRECTOR DE TESIS: M.C. CONSTANTINO GUTIÉRREZ PALACIOS



MEXICO, D.F.

2002

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/UTIT/134/98

Señor
ANTONIO A. MARTÍNEZ RAMÍREZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **M.C. CONSTANTINO GUTIÉRREZ PALACIOS**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

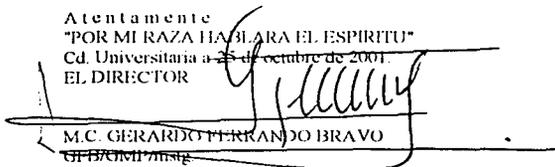
"FILTROS PERCOLADORES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES"

- I. INTRODUCCION**
- II. ANTECEDENTES**
- III. TEORÍA DEL PROCESO DE BIODEGRADACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN UN REACTOR BIOLÓGICO DE CULTIVO FIJO**
- IV. TIPOS DE FILTROS PERCOLADORES**
- V. ANÁLISIS DE CRITERIOS DE DISEÑO DE UN FILTRO PERCOLADOR**
- VI. EJEMPLO DE DISEÑO DE UN FILTRO PERCOLADOR**
- VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**
- VIII. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA**
- IX. ANEXOS**

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 ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 25 de octubre de 2001.
EL DIRECTOR


M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GF/B/CIV/Ansg

DEDICATORIAS

A Dios, a quien le dedico todo lo que soy.

A mis padres, Arsenio y Tere, a quienes agradezco su amor, cuidado y procuración, y a quienes les debo la vida y todo en ella.

Si llegara a ser así, les dedico este trabajo a mi (s) hijo (s), como muestra y ejemplo a superar en su vida.

Mis dedicatorias a ustedes, gracias.

Antonio Alejandro Martínez Ramírez

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la que agradezco el haberme brindado su invaluable enseñanza que me ha permitido desarrollarme personal y profesionalmente.

A la Facultad de Ingeniería, por permitirme tener el orgullo de pertenecer a ella.

A todos los profesores que intervinieron y marcaron mi formación académica, por su interés y dedicación académica, y de manera especial a los siguientes profesores: M.C. Constantino Gutiérrez Palacios, M.I. Hugo S. Haaz Mora, Ing. Héctor Guzmán Olgún, Ing. Enrique Barranco Vite, Ing. Jesús Gallegos Silva, por su participación en la elaboración y evaluación de este trabajo.

A todos mis compañeros y hoy grandes amigos universitarios, por todos los momentos entrañables, experiencias vividas y su apoyo incondicional, a todos ustedes, muchas gracias.

A Maritza, quien con su invaluable compañía y gran amor, me alentó y apoyó incondicionalmente en las decisiones tomadas para concluir esta etapa de mi vida, muchas gracias.

A todas mis amigas y amigos que en el transcurso de mi vida me han acompañado y son parte de mis logros, muchas gracias a ustedes por permitirme ser parte de mí.

A todos mis familiares quienes siempre han procurado lo mejor para mí, y que me consideran como un hijo o como un hermano, muchas gracias.

A todos aquellos que han sido parte de mi vida.

A todos ustedes, gracias.

Antonio Alejandro Martínez Ramírez

FILTROS PERCOLADORES EN EL TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

CONTENIDO

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	13
I. ANTECEDENTES.....	17
I.1 Definición de aguas residuales.....	17
I.2 Fuentes de contaminación del agua.....	17
1.2.1 Origen y componentes de las aguas residuales.....	20
1.2.2 Condición de las aguas residuales.....	22
I.3 Características de las aguas residuales.....	22
1.3.1 Exploración, muestreo y análisis.....	31
1.3.1.1 Exploración.....	31
1.3.1.2 Muestreo.....	32
1.3.1.3 Análisis.....	34
I.4 Caracterización de las aguas residuales municipales.....	34
I.5 Enfermedades humanas transmitidas por el agua.....	37
1.5.1 Características de las enfermedades.....	38
1.5.1.1 Transmisión microbiológica: fecal - oral.....	39
1.5.1.2 Transmisión por insectos relacionados con el agua.....	41
1.5.1.3 Transmisión mediante agentes químicos o físicos.....	43
I.6 Bases del tratamiento de las aguas residuales municipales.....	44
I.7 Métodos de tratamiento secundario de agua residual municipal.....	48
1.7.1 Descripción de los principales métodos de tratamiento secundario de aguas residuales municipales.....	52
1.7.1.1 Lodos activados.....	54
1.7.1.2 Lagunas de estabilización aerobia.....	55
1.7.1.3 Filtro percolador.....	55
1.7.1.4 Laguna aireada aerobia.....	56
1.7.1.5 Sistema biológico giratorio o biodiscos.....	56
1.7.1.6 Proceso anaerobio de contacto.....	57

CONTENIDO

1.7.1.7	Lagunas anaerobias.....	57
1.7.1.8	Lagunas facultativas.....	57
II. TEORÍA DEL PROCESO DE BIODEGRADACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN UN REACTOR DE CULTIVO FIJO.....		61
II.1 Fundamentos de microbiología.....		61
II.1.1	Bacterias.....	63
II.1.2	Hongos.....	64
II.1.3	Algas.....	65
II.1.4	Protozoos.....	67
II.1.5	Rotíferos.....	68
II.1.6	Crustáceos.....	68
II.1.7	Virus.....	69
II.2 Crecimiento bacterial y oxidación biológica en un reactor biológico.....		69
II.2.1	Crecimiento en cultivos puros.....	70
II.2.2	Crecimiento en cultivos mixtos.....	72
II.2.3	Cinética del crecimiento biológico.....	72
II.2.3.1	Crecimiento logarítmico: Cultivo de alimentación discontinua.....	73
II.2.3.2	Crecimiento con limitación de sustrato.....	73
II.2.3.3	Crecimiento celular y utilización del sustrato.....	74
II.2.3.4	Efectos del metabolismo endógeno.....	75
II.2.4	Oxidación bacteriana.....	77
II.2.4.1	Enzimas.....	78
II.2.4.2	Procesos disimilatorios y asimilatorios.....	79
II.2.4.3	Necesidad de nutrientes.....	82
II.2.4.4	Ciclo aerobio.....	82
II.3 Descomposición aerobia en un sistema biológico de cultivo fijo.....		84
II.3.1	Descripción del proceso.....	85
II.3.2	La película de lama microbiana o biomasa.....	86
II.3.3	Microbiología de la biomasa.....	88
II.3.4	Tiempo de residencia de la biomasa.....	90
II.3.5	Producción de humus.....	92

CONTENIDO

II.4 Factores ambientales que afectan la actividad microbiótica.....	93
II.4.1 Temperatura.....	93
II.4.2 Presión osmótica.....	96
II.4.3 Oxígeno molecular.....	96
II.4.4 Agua líquida.....	96
II.4.5 Radiación ultravioleta.....	96
II.4.6 pH.....	97
II.4.7 Ácidos y bases.....	97
II.4.8 Agentes oxidantes y reductores.....	97
II.4.9 Iones y sales de metales pesados.....	98
III. TIPOS DE FILTROS PERCOLADORES.....	101
III.1 Accesorios y dispositivos.....	101
III.1.1 Sistema de distribución.....	102
III.1.2 Medio filtrante.....	107
III.1.3 Sistema de bajo dren.....	109
III.1.4 Ventilación.....	111
III.2 Medio filtrante.....	114
III.2.1 Características de los medios filtrantes.....	114
III.2.2 Medios convencionales.....	116
III.2.3 Medios sintéticos.....	118
III.2.3.1 Configuración de los medios sintéticos.....	119
III.2.3.2 Funcionamiento de los medios plásticos.....	123
III.3 Clasificación de los filtros percoladores.....	124
III.3.1 Filtro de carga baja.....	125
III.3.2 Filtro de carga intermedia.....	127
III.3.3 Filtro de carga alta.....	128
III.3.4 Filtro de carga muy alta.....	129
III.4 Arreglo de filtros percoladores en la planta de tratamiento de aguas residuales..	131
III.4.1 Estructuras adyacentes.....	131
III.4.2 Recirculación.....	132
III.4.3 Disposición de filtros percoladores en etapas con recirculación.....	135

CONTENIDO

III.4.3.1	Filtros percoladores en una etapa	135
III.4.3.2	Filtros percoladores en dos etapas	137
III.4.3.3	Filtros percoladores en doble filtración alternada.....	140
IV.	ANÁLISIS DE CRITERIOS DE DISEÑO DE UN FILTRO PERCOLADOR... 145	
IV.1	Modelos de funcionamiento del filtro percolador.....	145
IV.2	Eficiencia de biofiltración.	146
IV.3	Método de diseño NRC.....	147
IV.4	Método de diseño basado en las ecuaciones de Eckenfelder, Bruce & Merkens. ..	150
IV.5	Procedimiento de diseño con datos de planta piloto o semipiloto.	157
IV.5.1	Modelo de filtro percolador semipiloto.....	159
IV.5.2	Tratamiento de los datos obtenidos con objeto de determinar las constantes n y K.....	160
IV.5.3	Aplicación de los resultados al diseño de un filtro percolador a escala real.....	162
IV.5.3.1	Caso 1 Filtro percolador sin reciclado.....	162
IV.5.3.2	Caso 2 Filtro percolador con reciclado.....	163
IV.6	Método de diseño de la CNA de 1994.....	164
IV.6.1	Características del proceso.	164
IV.6.2	Eficiencia del proceso.	166
IV.6.3	Consumo de energía.....	169
IV.7	Selección del criterio de diseño.....	170
V.	EJEMPLO DE DISEÑO DE UN FILTRO PERCOLADOR..... 175	
V.1	Selección del método de diseño.....	175
V.2	Consideraciones de diseño.	175
V.2.1	Ejemplo con el método de la CNA.....	176
V.2.2	Ejemplo con el método de la NRC.....	180
V.2.3	Ejemplo con el método de Eckenfelder.....	183
V.3	Comparación y análisis de resultados.....	189
V.4	Diseño hidráulico de los brazos distribuidores.....	193

CONTENIDO

V.5 Aspectos constructivos del filtro percolador.....	200
V.5.1 Ingeniería básica.....	200
V.5.2 Topografía.....	203
V.5.3 Tipo de Suelo.....	205
V.5.4 Especificaciones de construcción, equipamiento y montaje.....	206
V.5.5 Especificaciones de equipamiento y montaje.....	208
V.6 Operación y mantenimiento del filtro percolador.....	209
V.6.1 Manual de operación y mantenimiento.....	209
V.6.1.1 Responsabilidades del operador.....	209
V.6.2 Prearranque, arranque y operación normal.....	210
V.6.2.1 Prearranque.....	210
V.6.2.2 Arranque.....	211
V.6.2.3 Operación normal.....	211
V.6.2.4 Paro de la planta.....	212
V.6.3 Control del proceso.....	214
V.6.3.1 Monitoreo.....	214
V.6.3.2 Operación.....	215
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	219
Conclusiones.....	219
Recomendaciones.....	223
REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....	229
ANEXOS.....	233
Anexo A Inventario nacional de plantas de tratamiento con sistema biológico al mes de Diciembre de 2000.....	233
Anexo B Normatividad.....	239

LISTA DE TABLAS

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	<i>Características de los diversos tipos de agua residual.</i>	20
Tabla 2	<i>Principales características físicas del agua residual.</i>	23
Tabla 3	<i>Principales características biológicas del agua residual.</i>	25
Tabla 4	<i>Principales características químicas del agua residual: materia orgánica.</i>	26
Tabla 5	<i>Principales características químicas del agua residual: medición del contenido orgánico.</i>	27
Tabla 6	<i>Principales características químicas del agua residual: materia inorgánica.</i>	28
Tabla 7	<i>Principales características químicas del agua residual: gases.</i>	29
Tabla 8	<i>Frecuencia de muestreo.</i>	33
Tabla 9	<i>Composición típica del agua residual antes de su tratamiento.</i>	34
Tabla 10	<i>Características de aguas residuales domésticas de diversas regiones en México (en mg / l, excepto los indicados).</i>	35
Tabla 11	<i>Enfermedades transmitidas por el agua: fuentes microbiológicas.</i>	39
Tabla 12	<i>Enfermedades transmitidas por el agua.</i>	42
Tabla 13	<i>Enfermedades transmitidas por el agua: fuentes químicas y otras.</i>	43
Tabla 14	<i>Principales procesos y operaciones unitarias usadas en los sistemas de tratamiento para la remoción de los principales contaminantes.</i>	46
Tabla 15	<i>Principales procesos de tratamiento biológico para el tratamiento del agua residual.</i>	50
Tabla 16	<i>Los tres reinos de microorganismos.</i>	61
Tabla 17	<i>Reacciones bioquímicas exotérmicas típicas.</i>	80
Tabla 18	<i>Clasificación de microorganismos según su tolerancia a la temperatura.</i>	94
Tabla 19	<i>Coefficientes de temperatura para diversos procesos biológicos.</i>	95
Tabla 20	<i>Granulometría aconsejable de material filtrante para filtros percoladores.</i>	117
Tabla 21	<i>Características de varios tipos de medios filtrantes.</i>	122
Tabla 22	<i>Información de características típicas de filtros percoladores.</i>	130
Tabla 23	<i>Valores de n y K_{20} para algunos medios filtrantes en aguas domésticas sedimentadas.</i>	154
Tabla 24	<i>Valores de n y K_{20} para diversos tipos de aguas residuales.</i>	155
Tabla 25	<i>Valores típicos de las constantes de tratabilidad para un filtro percolador de 20 pies con medio plástico.</i>	155
Tabla 26	<i>Características de filtros percoladores según CNA 1994.</i>	164

LISTA DE TABLAS

Tabla 27	<i>Características típicas de distintos medios para filtros percoladores según CNA 1994.</i>	165
Tabla 28	<i>Valores de R dada una S_o para la fórmula de recirculación de la EPA.</i>	168
Tabla 29	<i>Valores típicos de SK según la carga orgánica.</i>	169
Tabla 30	<i>Predicción de población y gasto de agua residual doméstica a tratar.</i>	176
Tabla 31	<i>Comparación de resultados obtenidos por lo métodos de la CNA, NRC y Eckenfelder para los datos de ejemplo.</i>	189

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	<i>Mapa de los principales acuíferos nacionales.</i>	18
Figura 2	<i>Calidad de las aguas superficiales nacionales, distribución porcentual de la calidad del agua en 535 cuerpos superficiales (CNA situación al 2000).</i>	18
Figura 3	<i>Interrelación entre sólidos presentes en el agua residual, (adaptado de Metcalf & Eddy, 1996).</i>	23
Figura 4	<i>Composición del agua residual, (Romero, 1991).</i>	37
Figura 5	<i>Ejemplo de operaciones y procesos unitarios, en un diagrama de bloques de procesos de tratamiento a nivel secundario.</i>	47
Figura 6	<i>Porcentaje de métodos de tratamiento utilizados con respecto al número de plantas de tratamiento a nivel nacional, (CNA).</i>	53
Figura 7	<i>Imagen de bacterias tipo Staphylococcus.</i>	63
Figura 8	<i>Imagen de un hongo tipo Phycomycete.</i>	65
Figura 9	<i>Imagen de algas en el agua residual.</i>	66
Figura 10	<i>Imagen de un protozoo ciliado.</i>	68
Figura 11	<i>Curva de crecimiento bacteriano típica.</i>	71
Figura 12	<i>Curva de crecimiento relativo de los microorganismos en el curso de estabilización de un residuo orgánico en un medio líquido.</i>	72
Figura 13	<i>Representación esquemática del metabolismo bacteriano heterótrofo.</i>	77
Figura 14	<i>Representación esquemática del sistema ADP-ATP de transferencia de energía celular.</i>	80
Figura 15	<i>Representación esquemática del metabolismo bacteriano quimiosintético y autótrofo.</i>	81
Figura 16	<i>Representación esquemática del metabolismo bacteriano fotosintético y autótrofo.</i>	82
Figura 17	<i>Representación esquemática del ciclo aerobio.</i>	84
Figura 18	<i>Representación esquemática de la sección transversal de una película biológica en un filtro percolador.</i>	86
Figura 19	<i>Mosca tipo Psychoda común en filtros percoladores.</i>	90
Figura 20	<i>Elementos principales de un filtro percolador típico.</i>	102
Figura 21	<i>Boquilla fija tipo pulverizadora para filtro percolador.</i>	103
Figura 22	<i>Brazo distribuidor de un filtro percolador.</i>	103
Figura 23	<i>Detalle del montaje del brazo distribuidor en la columna central de un filtro percolador.</i>	

LISTA DE FIGURAS

.....	105
Figura 24 <i>Detalle la boquilla en un brazo distribuidor de un filtro percolador.</i>	106
Figura 25 <i>Columna central de un filtro percolador de gran diámetro.</i>	107
Figura 26 <i>Medio filtrante de roca.</i>	108
Figura 27 <i>Medio filtrante sintético.</i>	108
Figura 28 <i>Tipos de bloques de drenaje de concreto precolado.</i>	110
Figura 29 <i>Imagen de un filtro percolador cubierto con domo y sistema de ventilación.</i>	112
Figura 30 <i>Sección transversal del filtro percolador típico.</i>	113
Figura 31 <i>Imagen de medio filtrante mineral convencional (roca).</i>	117
Figura 32 <i>Imagen de medio filtrante sintético (común).</i>	118
Figura 34 <i>Imagen de medio filtrante sintético de lámina corrugada.</i>	121
Figura 35 <i>Imagen de medio filtrante sintético (anillo especial).</i>	122
Figura 37 <i>Imagen de filtro percolador de baja carga.</i>	126
Figura 38 <i>Imagen de un filtro percolador de carga intermedia.</i>	128
Figura 39 <i>Imagen de un filtro percolador de alta carga.</i>	129
Figura 40 <i>Imagen de filtros percoladores de carga muy alta.</i>	130
Figura 41 <i>Imagen de filtros percoladores con un clarificador en primer plano.</i>	132
Figura 42 <i>Imagen de conjunto de válvulas de recirculación para filtros percoladores.</i>	133
Figura 43 <i>Diagramas de modelos de flujo para filtros percoladores en una etapa.</i>	137
Figura 44 <i>Diagramas de modelos de flujo para filtros percoladores en dos etapas.</i>	139
Figura 45 <i>Diagramas del modelo de flujo para filtros percoladores con filtración alternada.</i>	140
Figura 46 <i>Eficiencia de eliminación de DBO₅ en función de la carga aplicada para diversas instalaciones de filtros percoladores (Datos de archivo Metcalf & Eddy).</i>	147
Figura 47 <i>Comparación de datos de operación de filtros percoladores con la fórmula NRC.</i>	150
Figura 48 <i>Modelo de laboratorio de filtro percolador semipiloto.</i>	159
Figura 49 <i>Imagen mostrando el movimiento del brazo provocado por la reacción del chorro.</i> ..	193
Figura 50 <i>Distribución de gasto ideal y actual en el brazo distribuidor.</i>	197
Figura 51 <i>Imagen mostrando la variación del gasto en cada boquilla.</i>	198
Figura 52 <i>Sistema de bombeo y caja de carga para filtros percoladores.</i>	199
Figura 53 <i>Tren de tratamiento típico para filtro percolador mostrando estructuras adyacentes.</i>	202
.....	202
Figura 54 <i>Aspectos constructivos de instalaciones adyacentes a los filtros percoladores.</i>	204
Figura 55 <i>Aspecto del tipo de acabado de un filtro percolador.</i>	208

INTRODUCCIÓN

El hombre, con su acelerado crecimiento demográfico, y con el desarrollo de grandes sociedades industriales y económicas, ha llevado consigo una serie de ventajas indiscutibles, el nivel y la calidad de vida han aumentado considerablemente, aunque también ha aumentado la necesidad de satisfacer la demanda de servicios y productos que la población requiere, entre ellos el agua. Para el aprovechamiento del agua en usos industriales o domésticos, se requiere que ésta tenga ciertas características, las cuales por lo general se tienen cuando el agua es utilizada por vez primera, pero, por lo antes expuesto, este recurso es cada vez más difícil encontrarlo en dichas condiciones, lo cual lleva a la problemática que esto representa para las futuras generaciones.

El agua, elemento indispensable para la vida de todos los seres vivos, se ha mantenido casi constante en cantidad en el planeta, sin embargo, se encuentra distribuida de manera irregular. El 97.3% del agua en el planeta es del tipo oceánica, y el 2.7% es de agua dulce. La República Mexicana no es muy abundante en recursos hidráulicos; posee aproximadamente 0.1% del total anual de agua dulce en el mundo, lo que hace que un alto porcentaje del territorio esté catalogado como semidesértico (Margalef, 1974). Ello genera una baja disponibilidad de agua debido, fundamentalmente, a razones climáticas; esto representa la primera causa del problema de agua en México.

La contaminación ambiental, y particularmente la del agua, provocada por desechos líquidos y sólidos, es un problema que tiene una importancia relevante en el ámbito nacional e internacional, por estar ampliamente relacionado con la vida del hombre y su entorno. Aún más, por el inadecuado manejo de las aguas residuales, que está poniendo en riesgo en muchos casos la disponibilidad de los recursos existentes. Dada la urgencia de frenar este creciente deterioro, es necesaria la implantación de sistemas que permitan tratar adecuadamente las aguas residuales antes de que sean descargadas en cuerpos receptores como ríos o lagos, y darle la posibilidad de algún uso posterior.

La utilización del agua, crea derechos y obligaciones entre los usuarios, y por lo tanto, es necesario apegarse a la legislación y normas jurídicas cada vez más estrictas que regulan unas y otras para de esta manera, hacer racional el uso del agua y evitar conflictos en lo posible.

INTRODUCCIÓN

Por lo anterior, con este trabajo de tesis, se presentará el tratamiento biológico de aguas residuales domésticas, a través del sistema conocido como filtros percoladores, atendiendo al objetivo principal de reunir información dispersa y útil sobre el tema, que sea de ayuda tanto a estudiantes y profesores, como a personas interesadas en el área.

En el primer capítulo, se enuncian los conceptos básicos del tema, como son: agua residual, caracterización y tratamiento de aguas residuales domésticas, mencionando también, sus fuentes de contaminación, problemas en la salud con sus contaminantes, así como la descripción de los métodos secundarios de tratamiento de aguas residuales y legislación correspondiente. En el segundo capítulo, se exponen las bases de microbiología y se describe en forma general el proceso de descomposición de la materia orgánica del agua residual doméstica por medio de los microorganismos presentes en las mismas aguas. El capítulo siguiente, está enfocado a la clasificación de los filtros percoladores y su teoría de funcionamiento, así como de sus accesorios y dispositivos. En el cuarto capítulo, se analizan los criterios más comunes para el diseño de un filtro percolador, analizando también las recomendaciones de la Comisión Nacional del Agua (CNA) para el diseño de filtros percoladores en México. En el último capítulo, se presenta un ejemplo de diseño de un filtro percolador, considerando sus requerimientos mecánicos e hidráulicos de funcionamiento, así como aspectos constructivos de las estructuras principales que lo componen, y procedimientos de operación y mantenimiento.

Por último, se mencionan las conclusiones obtenidas en este trabajo, así como recomendaciones generales para el tratamiento biológico de aguas residuales con el sistema de filtros percoladores.

ANTECEDENTES

I. ANTECEDENTES

I.1 Definición de aguas residuales.

El agua después de haber sido objeto de múltiples usos en las comunidades humanas, tiene que ser alejada de las mismas por las características desagradables y peligrosas que en tales usos adquiere, recibiendo el nombre genérico de "aguas residuales". Se acostumbra llamar "agua residual doméstica" a la resultante del aseo de personas y casas-habitación, y "agua residual industrial" a la desechada por los centros de producción.

En la norma oficial mexicana NOM-001-ECOL-1996 (NOM 001), que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, se define al agua residual como "las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, doméstica, incluyendo fraccionamientos y en general cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas".

I.2 Fuentes de contaminación del agua.

Según la Comisión Nacional del Agua (CNA), son 314 las cuencas hidrológicas con sus correspondientes acuíferos (figura 1), de las que depende el país, de una u otra forma, nuestros recursos hidráulicos, sin embargo, a causa de su magnitud e importancia, y a que el aprovechamiento de estas ha sido mucho más intensa y por lo tanto han sido sobre explotadas, es en 20 cuencas en donde se genera el 89% de la carga orgánica total del país medida en términos de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), teniendo como consecuencia, que se encuentren contaminadas o en proceso de deterioro en diferentes grados (figura 2).



Figura 1 Mapa de los principales acuíferos nacionales.

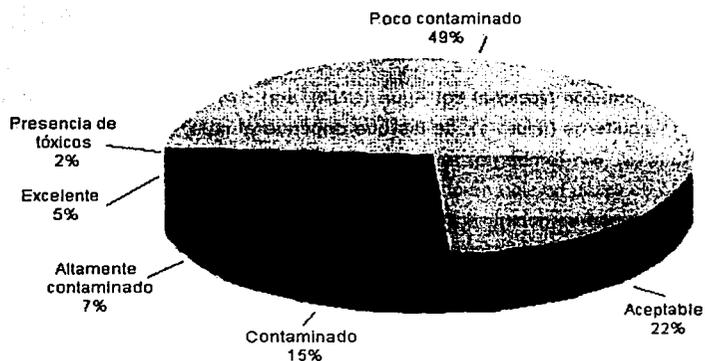


Figura 2 Calidad de las aguas superficiales nacionales, distribución porcentual de la calidad del agua en 535 cuerpos superficiales (CNA situación al 2000).

La aportación de contaminantes por los centros urbanos y por la industria, está dada de la siguiente forma (CNA 2001):

a) Los centros urbanos generan:

- Aguas residuales: 7.88 km³/año (250 m³/s)
- Se recolectan en alcantarillado: 6.30 km³/año (200 m³/s)
- Se generan: 1.94 millones de toneladas de DBO al año.
- Se recolectan en alcantarillado: 1.56 millones de toneladas de DBO al año.
- Se remueven en los sistemas de tratamiento: 0.36 millones de toneladas de DBO al año.

b) La industria genera:

- Aguas residuales: 5.36 km³/año (170 m³/s)
- Se generan: 6.16 millones de toneladas de DBO al año.
- Se remueven en los sistemas de tratamiento: 0.80 millones de toneladas de DBO al año.

Por convención, se considera la contaminación del agua como la introducción o emisión de ella de organismos patógenos o sustancias tóxicas que la hacen inapropiada para consumo humano o uso doméstico (Fair, 1990).

En la Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996 (NOM 002), se llaman contaminantes básicos a "aquellos compuestos y parámetros que se presentan en las descargas de aguas residuales y que pueden ser removidos o estabilizados mediante tratamientos convencionales. En lo que corresponde a ésta Norma Oficial Mexicana sólo se consideran los siguientes: grasas y aceites, materia flotante, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno₅, nitrógeno total (suma de las concentraciones de nitrógeno Kjeldahl de nitritos y de nitratos, expresadas como mg/litro de nitrógeno), fósforo total, temperatura y pH".

La cantidad de contaminantes adicionados a un cuerpo de agua es función lineal del uso que se le dé.

Desde el punto de vista de las fuentes de generación, estas pueden ser residencias,

instituciones públicas, establecimientos industriales y comerciales, tomando en cuenta que a estas aguas pueden agregarse eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales, incluyendo también las aguas de origen agrícola, pero siendo las de tipo urbano e industrial las que producen aguas residuales con mayor cantidad de contaminantes puesto que más del 75% de la población nacional habita en zonas urbanas. Sin embargo, aún dentro de estos dos grupos hay marcadas diferencias en el contenido de compuestos. La diferencia más importante entre los dos tipos de agua radica en la gran cantidad de compuestos, de origen industrial, que se adicionan a este tipo de agua, dificultando aún más su tratamiento.

Tabla 1 *Características de los diversos tipos de agua residual.*

<i>Tipos de agua residual</i>	<i>Características</i>
Urbanas	Grandes volúmenes Alto contenido de materia orgánica Patógenos Poca variación en la composición Variación horaria
Industriales	Grandes volúmenes Gran variación en la composición Descargas continuas o periódicas
Agrícolas	Volumen dependiente de la precipitación y permeabilidad del suelo. Componentes del suelo, fertilizantes y plaguicidas

FUENTE: ADAPTADO DE METCALF & EDDY, 1991.

1.2.1 Origen y componentes de las aguas residuales

Conocidas las fuentes de contaminación del agua residual, a continuación se menciona el origen y los componentes de las mismas. Entendiendo por composición a los constituyentes físicos, químicos y biológicos del agua residual.

-
- a) Agua residual doméstica o sanitaria. Es el agua procedente de residencias, instalaciones comerciales, públicas y similares, procedente de cocinas, baños, lavabos, sanitarios y lavandería. A las materias minerales orgánicas originalmente contenidas en el agua suministrada a la comunidad, se agregan un cúmulo de materias fecales, papel, jabón, suciedad, restos de alimentos (basura), y otras sustancias. Gran parte de la materia residual es orgánica y útil para los microorganismos saprofitos, es decir, organismos de la descomposición.

Debe suponerse que se encuentran presentes organismos entéricos en las aguas negras domésticas, que las hacen peligrosas para el hombre.

- b) Agua residual industrial. Es el agua resultante de los procesos industriales en la cual predominan productos de desecho químico principalmente, que varían en volumen y características dependiendo del tipo de establecimiento industrial. Algunas son aguas de enjuague relativamente limpias; otras se encuentran fuertemente cargadas de materia orgánica o mineral, o con sustancias corrosivas, venenosas, inflamables o explosivas.
- c) Agua pluvial. Agua resultante del escurrimiento superficial de las lluvias, donde se incluye también las que provienen de nieve o granizo. Su volumen varía según la intensidad de la precipitación, la topografía y las superficies pavimentadas y techadas. Esta agua arrastra polvo, tierra, sedimentos, materia vegetal y basura como consecuencia del lavado de la superficie por donde escurre.
- d) Infiltraciones y conexiones incontroladas. Agua que penetra en forma no controlada en la red de alcantarillado, infiltración procedente del agua del subsuelo o del agua pluvial que es descargada a la red por bajantes de agua de edificios, drenes de cimentaciones y alcantarillas pluviales, su composición es similar a la del agua pluvial, pero su volumen no puede ser determinado con exactitud porque depende de la estructura del suelo, del tipo y estado del alcantarillado, condiciones climatológicas, etc.

1.2.2 Condición de las aguas residuales

El nivel y la naturaleza de la descomposición de los sólidos contenidos en las aguas residuales han dado origen a los siguientes términos que describen la condición o estado de las aguas residuales.

- a) Agua residual fresca. Se refiere al agua a la cual se le acaba de agregar la materia contaminante. Contiene oxígeno disuelto y sólidos en suspensión en cantidades variables. Son turbias, de color grisáceo, tienen un olor mohoso no desagradable.
- b) Agua residual séptica. Describe al agua residual en la que se ha agotado completamente el oxígeno disuelto, de manera que se realiza una descomposición anaerobia de los contaminantes. Se caracteriza por un color negruzco, olor fétido y desagradable, y por tener sólidos suspendidos de color negro.
- c) Agua residual estabilizada. Es el agua en la que los contaminantes han sido descompuestos hasta sólidos prácticamente inertes. El oxígeno disuelto está nuevamente presente, su color es ligero o nulo, y tiene pocos sólidos suspendidos.

1.3 Características de las aguas residuales

Debido a la gran diversidad de elementos y compuestos que pueden estar presentes en las aguas residuales, no es factible dar detalle de los componentes presentes en una muestra dada, sin embargo, se puede considerar que existe un conjunto de ellos que tienen importancia por la influencia que ejercen en la selección de una tecnología de tratamiento del agua (figura 3); así como en el diseño y operación de la planta de tratamiento, los cuales se dividen en características físicas, químicas y biológicas.

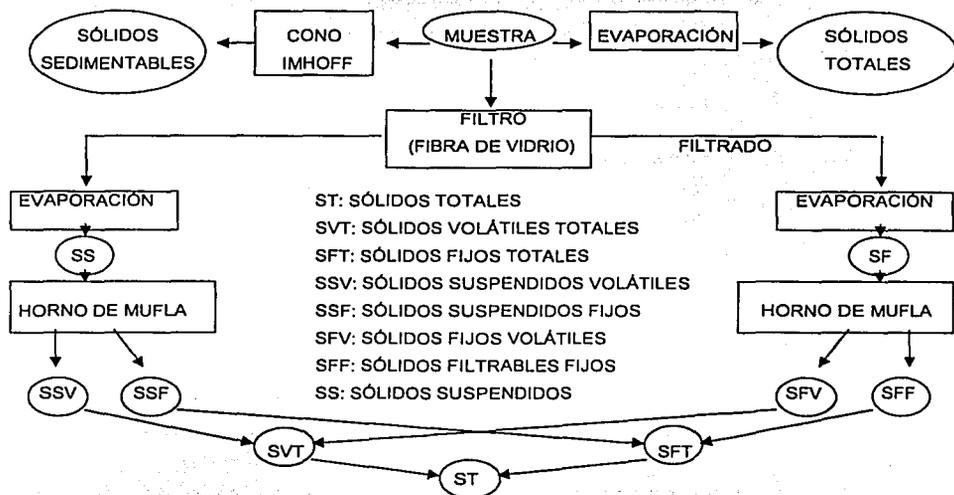


Figura 3 Interrelación entre sólidos presentes en el agua residual, (adaptado de Metcalf & Eddy, 1996).

Tabla 2 Principales características físicas del agua residual.

Característica	Descripción	Importancia en el Tratamiento
Sólidos Totales (ST) (mg/l)	Contenido de sólidos totales que queda como residuo en la evaporación del agua entre 103 y 105 °C.	Poca importancia si se hace una interpretación aislada. Útil al relacionarlo con otros parámetros.
Sólidos sedimentables (mg/l)	Sólidos removidos en cono Imhoff en 60 min a temperatura ambiente.	Medida de la cantidad de lodos que se obtendrá en una sedimentación primaria.

Sólidos suspendidos (SS) (mg/l)	Sólidos retenidos en un filtro de fibra de vidrio o de membrana de poli carbonato.	Están sujetos a una rápida degradación (hidrólisis) y son un factor importante en el tratamiento y disposición de las aguas residuales.
Sólidos Disueltos (SD) (mg/l)	Sólidos capaces de filtrarse por poros como los mencionados en SS. Sólidos coloidales: materia particulada con un intervalo de tamaño de 0.001 a 1 μ m.	La fracción coloidal no puede removerse por sedimentación, sino por reacciones biológicas o coagulación seguida de sedimentación.
Ambos sólidos se pueden subdividir en:		
Volátiles (SSV y SDV) (mg/l)	Sólidos orgánicos que se oxidan y volatilizan a 550 ± 50 °C.	Contenido orgánico de los sólidos (disueltos y sedimentables).
Fijos (SSF y SDS) (mg/l)	Sólidos inorgánicos que quedan como cenizas al calentarlos a 550 ± 50 °C.	Contenido inorgánico de los sólidos (disueltos y sedimentables).
Olor	Causado por gases desprendidos de la descomposición de materia orgánica y/o sustancias adicionadas al agua residual.	Factor importante en el diseño, ubicación y operación de una planta de tratamiento, por afectar a la población cercana.
Temperatura (°C.)	En general, la temperatura del agua residual es mayor que la temperatura de la fuente y mayor que la temperatura del aire del ambiente (excepto climas cálidos).	Tiene efectos en otras propiedades, como aceleración de reacciones, reducción de solubilidad de gases, intensifica olores, influencia en el crecimiento y actividad de microorganismos
Densidad (Kg/m ³)	Se define como masa por unidad de volumen.	Importante en formación de corrientes por diferencias de

Color	Condición del agua	densidades en tanques de sedimentación.
Turbiedad (UTN)	Medida basada en la intensidad de la luz dispersada por una suspensión.	Rechazo de consumidores. Indica calidad del agua en relación con materia coloidal.

FUENTE: METCALF & EDDY, 1991.

Tabla 3 Principales características biológicas del agua residual.

Característica	Descripción	Importancia en el Tratamiento
Organismos eucariontes:		Algas: producen oxígeno por fotosíntesis.
Unicelulares	Con poca o sin distinción de tejidos, ejemplo protistas (algas, hongos, protozoarios).	Hongos: sobreviven con pH bajo y condiciones de nitrógeno limitadas. Protozoarios: Actúan como limpiadores del efluente del tratamiento biológico al consumir bacterias y partículas de materia orgánica.
Multicelulares	Con distinción celular y de tejidos, ejemplo desde rotíferos microscópicos hasta crustáceos macroscópicos,	Determinan la toxicidad de las aguas residuales descargadas al ambiente y la eficiencia del tratamiento biológico secundario.
Eubacteria	Química celular similar a los eucariontes.	En su mayoría bacterias con funciones de descomposición y estabilización de materia orgánica.
Archaeobacteria	Química celular distinta	

Virus	Organismos parásitos formados de cadenas de material genético (ADN y RNA) y una capa proteica.	Sin capacidad de sintetizar nuevos compuestos, pero capaces de producir nuevas partículas virales a expensas de la célula huésped para su posterior proliferación.
-------	--	--

FUENTE: METCALF & EDDY, 1991.

Muy importante es mencionar que los organismos anteriores (bacterias, virus, protozoarios y helmintos), son considerados como organismos patógenos, ya que causan enfermedades en los humanos.

Las características químicas del agua residual, se presentarán en cuatro partes: (1) materia orgánica; (2) medición del contenido orgánico; (3) materia inorgánica y (4) gases.

Tabla 4 Principales características químicas del agua residual: materia orgánica.

Característica	Descripción	Importancia en el Tratamiento
Proteínas	Constituyente principal de los organismos animales, no así en plantas.	En grandes cantidades producen olores desagradables por su descomposición, responsables de la presencia de nitrógeno en las aguas residuales.
Carbohidratos	Incluye azúcares, almidones, celulosa y fibra de madera. Contienen carbón, oxígeno e hidrógeno.	La celulosa es el carbohidrato más resistente a la descomposición.
Grasas y aceites	Compuestos de alcohol, glicerina y ácidos grasos.	Interfieren con la vida biológica de los organismos.

Surfactantes: sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	Moléculas orgánicas de gran tamaño y poco solubles en el agua, provenientes de detergentes sintéticos.	Forman espumas en las plantas de tratamiento, siendo algunos no biodegradables.
Contaminantes prioritarios	Cancerígenos, muta genéticos o altamente tóxicos.	Muchos de ellos clasificados como COV.
Compuestos orgánicos volátiles (COV)	Con punto de ebullición \leq a los 100 °C. y/o presión de vapor $>$ 1mm Hg a 25 °C.	Intervienen en la salud de los operadores principalmente
Pesticidas y químicos agrícolas.	No comunes en las aguas residuales domésticas.	Perjudiciales para los microorganismos de una planta de tratamiento.

FUENTE: METCALF & EDDY, 1991.

Tabla 5 Principales características químicas del agua residual: medición del contenido orgánico.

<i>Característica</i>	<i>Descripción</i>	<i>Importancia en el Tratamiento</i>
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	Mide la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para oxidar la materia orgánica contenida en el agua residual.	Parámetro útil para diseño de plantas de tratamiento, y determinar la eficiencia de un proceso de tratamiento.
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Prueba usada para medir la cantidad de materia orgánica en agua residual.	Utilizada para control y operación de la planta de tratamiento.

FUENTE: METCALF & EDDY, 1991.

Tabla 6 Principales características químicas del agua residual: materia inorgánica.

<i>Característica</i>	<i>Descripción</i>	<i>Importancia en el Tratamiento</i>
PH	Concentración de iones - hidrógeno, muestra la acidez o alcalinidad de una muestra. $PH = -\log_{10} [H^+]$	Importante para el tratamiento biológico de las aguas, ya que las bacterias requieren un pH medio, entre 6 y 8.
Alcalinidad	Resulta de la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos como calcio, magnesio, sodio, potasio o amonio.	El agua residual es normalmente alcalina, lo que ayuda a un cambio de pH provocado por los ácidos agregados.
Nitrógeno y fósforo	Nitrógeno: orgánico, amonio, nitrito y nitrato. Fósforo: orgánico, ortofosfato y polifosfato.	Son nutrientes esenciales para el crecimiento de plantas y organismos protistas.
Azufre	El ión de sulfato se encuentra naturalmente en el agua natural y en la residual.	Requerido en la síntesis de proteínas y liberado en su degradación.
Metales pesados	Muchos de estos metales están clasificados como contaminantes prioritarios, ejemplo: níquel, manganeso, plomo, cromo cadmio, zinc, cobre, fierro y mercurio.	Algunos de estos metales son necesarios para el crecimiento de la vida biológica, su exceso es tóxico.
Cloruros	Proveniente de sales del suelo, domésticas e industriales.	Los métodos convencionales de tratamiento no remueven significativamente los cloruros
Dureza	Es consecuencia de los iones metálicos de calcio y magnesio.	Produce incrustaciones en las tuberías.
Compuestos Inorgánicos Tóxicos	Muchos de estos compuestos están clasificados como contaminantes prioritarios, ejemplo: cobre, plomo, plata,	Tóxicos para muchos microorganismos y por lo tanto se deben considerar para el

cromo, arsénico y boro.

diseño de una planta de
tratamiento.

FUENTE: METCALF & EDDY, 1991.

Tabla 7 Principales características químicas del agua residual: gases.

<i>Característica</i>	<i>Descripción</i>	<i>Importancia en el Tratamiento</i>
Oxígeno Disuelto (OD)	Importante en el control de la calidad del agua, poco soluble en el agua.	Requerido para la respiración aeróbica de microorganismos así como de formas superiores de vida.
Sulfuro de hidrógeno	Formado por la descomposición anaeróbica de materia orgánica que contiene azufre o de la reducción de sulfitos y sulfatos, inflamable.	Olor desagradable, con efectos corrosivos.
Metano	Subproducto de la descomposición anaerobia de la materia orgánica.	Se le puede emplear como combustible, con alto riesgo de explosividad.

FUENTE: METCALF & EDDY, 1991.

De los contaminantes mencionados los más complicados de tratar son las sustancias orgánicas y las inorgánicas, en estas últimas se incluyen los metales pesados y los compuestos derivados de ellos.

En el renglón de materia orgánica se consideran dos grandes grupos, compuestos orgánicos naturales y compuestos orgánicos sintéticos. El primer grupo comprende todos los compuestos orgánicos tomados de la naturaleza (polisacáridos, proteínas, ácidos nucleicos, lípidos o fracciones de los mismos) usados con un propósito definido (alimento, abrigo, empaques, etc.), y agregados como desecho al agua. La característica principal de este grupo es que son compuestos

que han estado en contacto con los microorganismos a lo largo del proceso evolutivo, razón por la cual éstos generalmente los reconocen y utilizan como alimento, dando por resultado su degradación y fácil remoción.

El grupo de los compuestos orgánicos sintéticos incluye todos aquellos compuestos de fabricación humana que, teniendo como soporte a la petroquímica, se producen con el fin de cubrir las necesidades que los compuestos naturales suplan o lo hacían en forma parcial o deficiente. Su número ha aumentado en forma explosiva desde la Segunda Guerra Mundial; ejemplo son: plásticos, plaguicidas, bifénilos, detergentes sintéticos, entre otros.

La función desempeñada y la ayuda aportada al hombre por los compuestos orgánicos no tiene discusión; sin embargo, el hecho de ser moléculas con propiedades muy particulares y poco comunes con respecto a los compuestos naturales, los ha dejado en desventaja sobre estos últimos. Puesto que no han evolucionado a la par con los microorganismos, la probabilidad de ser reconocidos y, en consecuencia, degradados, es reducida; razón por la cual no se degradan fácilmente y son tóxicos, se bioacumulan, etc. Lo anterior, unido a la gran cantidad de compuestos empleados de este tipo, hace que se les considere problema prioritario en el tratamiento de aguas residuales, junto con la materia orgánica.

Un cuerpo de agua o una corriente natural sana como un lago o un río, poseen una capacidad limitada de autopurificación. Cuando esta capacidad se destruye o se agota, la corriente o el cuerpo se contaminan. La capacidad de auto purificación se debe a cantidades relativamente pequeñas de microorganismos presentes en el agua. Dichos microorganismos utilizan como alimento gran parte de la materia orgánica contaminante que llega de algún modo al agua. Los microorganismos forman un microsistema ecológico de bacterias, hongos y algas, que a su vez forma parte de una cadena alimenticia para otros organismos, como protozoarios, insectos, gusanos y peces. La presencia de dicha fauna en un río es una indicación de su salud.

En el proceso de purificación, las materias orgánicas se descomponen finalmente en compuestos simples como anhídrido carbónico o metano, y los microorganismos aumentan en número. Si se destruye la población microbiana, los solutos contaminantes que entran en el agua no se descompondrán y se acumularán en el agua. Según se acumulen los contaminantes, su concentración en el agua puede ser tan alta que no se podrá restablecer una población microbiana.

El agua queda entonces permanentemente contaminada.

I.3.1 Exploración, muestreo y análisis.

Para lograr un completo control de la calidad del agua, es necesario conocer las características y propiedades del agua, que ésta tiene antes y después del uso que le da el hombre, para saber si es necesario modificar dichas características.

Las variaciones de las propiedades del agua son más marcadas durante la purificación y tratamiento, y con ello, los requisitos de supervisión mediante análisis o control de la calidad del agua y de su respuesta a los cambios.

Por lo anterior, se explicarán los procedimientos fundamentales del examen a las aguas.

I.3.1.1 Exploración.

Las exploraciones de campo, según sus fines, reciben los siguientes nombres:

- a) Exploraciones sanitarias. Cuando identifican las condiciones de la cuenca acuífera que pueden afectar y poner en peligro la calidad del agua de abastecimiento.
- b) Exploraciones sobre contaminación. Cuando determinan los efectos de las aguas residuales sobre las masas receptoras.
- c) Exploraciones sobre residuos industriales. Cuando establecen los volúmenes característicos de los efluentes que proceden de establecimientos industriales.

Las exploraciones de campo normalmente incluyen, además, la observación de las principales características de la fuente de agua tales como crecimiento de plantas y algas acuáticas, sustancias flotantes de aspecto desagradable, bancos de lodo y sedimentos de fondo, existencia masiva de hongos y otras poblaciones contaminantes, y otras condiciones

desagradables a los sentidos del olfato y vista, proporcionando además, la oportunidad de medir propiedades como la temperatura y determinar los constituyentes químicos como el bióxido de carbono (CO₂) y el Oxígeno Disuelto (OD), que pueden cambiar durante el transporte y almacenamiento de las muestras.

1.3.1.2 Muestreo.

Una exploración de campo bien realizada puede compensar, sólo parcialmente, una escasez en la información analítica, ya que señala la posibilidad de acontecimientos futuros, pero no indica, como lo hacen el muestreo y análisis repetidos, las fluctuaciones reales en la calidad, que tienen lugar día a día o mes a mes. El muestreo frecuente permite establecer los valores medios y su variación, así como el grado de fluctuación en la calidad del agua.

El muestro bien dirigido y confiable, asegura la validez de los resultados analíticos. Para este fin, las muestras deben verdaderamente representar a la masa de agua o de aguas residuales de las que se toman, y no debe haber cambios significativos en las muestras tomadas, entre los tiempos de muestreo y análisis.

Para este efecto la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996 establece lo siguiente:

- a) "Muestra simple: la que se toma en el punto de descarga, de manera continua, en día normal de operación que refleje cuantitativa y cualitativamente el o los procesos más representativos de las actividades que generan la descarga, durante el tiempo necesario para completar cuando menos, un volumen suficiente para que se lleven a cabo los análisis necesarios para conocer su composición, aforando el caudal descargado en el sitio y en el momento del muestreo".
- b) "Muestra compuesta: la que resulta de mezclar el número de muestras simples, según lo indicado en la Tabla 8. Para conformar la muestra compuesta, el volumen de cada una de las muestras deberá ser proporcional al caudal de la descarga en el momento de su toma".

Tabla 8 Frecuencia de muestreo.

HORAS POR DIA QUE OPERA EL PROCESO GENERADOR DE LA DESCARGA	NUMERO DE INTERVALO ENTRE MUESTRAS TOMA DE MUESTRAS SIMPLES (HORAS)	NUMERO DE INTERVALO ENTRE MUESTRAS TOMA DE MUESTRAS SIMPLES	
		MINIMO	MÁXIMO
Menor que 4	mínimo 2	-	-
De 4 a 8	4	1	2
Mayor que 8 y hasta 12	4	2	3
Mayor que 12 y hasta 18	6	2	3
Mayor que 18 y hasta 24	6	3	4

El volumen de cada muestra simple necesario para formar la muestra compuesta se determina mediante la siguiente ecuación:

$$VMS_i = VMC \cdot (Q_i/Q_t)$$

Donde:

VMS_i = volumen de cada una de las muestras simples "i", litros.

VMC = volumen de la muestra compuesta necesario para realizar la totalidad de los análisis de laboratorio requeridos, litros.

Q_i = caudal medido en la descarga en el momento de tomar la muestra simple, litros por segundo.

Q_t = Q_i hasta Q_n, litros por segundo.

1.3.1.3 Análisis.

Los exámenes de laboratorio se relacionan con los análisis de las muestras tomadas en el campo, en las plantas de tratamiento y en los puntos de muestreo de los sistemas de distribución de agua, o en los sistemas de captación de aguas residuales. Es útil familiarizarse en lo relacionado con las aguas y aguas residuales, con las especificaciones, y con las condiciones de muestreo para seleccionar las pruebas de laboratorio e interpretar sus resultados. De acuerdo con lo que se ha dicho respecto a las exploraciones simples, el análisis de una sola muestra, sin importar cuán completa sea, esboza solamente un modelo fragmentario de las características del agua o aguas residuales en el momento del muestreo, sin embargo, hay pruebas que proporcionan información deductiva respecto a la historia de la contaminación del agua examinada.

1.4 Caracterización de las aguas residuales municipales.

Como las aguas naturales y residuales varían mucho en sus características, no es posible dar detalle de lo que se podría llamar características normales de una muestra dada, por lo que se realizan estudios llamados de caracterización, donde se determinan las características físicas, químicas y biológicas del agua residual. Como una guía, se muestran los parámetros de análisis más comunes y los resultados promedio de los análisis de aguas residuales domésticas.

Tabla 9 Composición típica del agua residual antes de su tratamiento.

Contaminantes	Unidades	Concentración		
		Débil	Mediana	Fuerte
Sólidos totales (ST)	mg/l	350	720	1200
Disueltos totales (SDT)	mg/l	250	500	850
fijos	mg/l	145	300	525
Volátiles	mg/l	105	200	325
Sólidos en suspensión (SS)	mg/l	100	220	350
fijos	mg/l	20	55	75
Volátiles	mg/l	80	165	275
Sólidos sedimentables	mg/l	5	10	20

Demanda Bioquímica Oxígeno 5 días, 20°C. (DBO ₅ 20°C.)	mg/l	110	220	400
Carbono Orgánico Total (COT)	mg/l	80	160	290
Demanda Química Oxígeno (DQO)	mg/l	250	500	1000
Nitrógeno (Total forma N)	mg/l	20	40	85
Orgánico	mg/l	8	15	35
Amoniaco libre	mg/l	12	25	50
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo (Total forma P)	mg/l	4	8	15
Orgánico	mg/l	1	3	5
Inorgánico	mg/l	3	5	10
Cloruros	mg/l	30	50	100
Sulfato	mg/l	20	30	50
Alcalinidad (como CaCO ₃)	mg/l	50	100	200
Grasas	mg/l	50	100	150
Coliformes totales	No./100ml	10 ⁵ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹
Compuestos Orgánicos Totales (COV)	µg/l	< 100	100-400	> 400

FUENTE: METCALF & EDDY, 1991.

Tabla 10 Características de aguas residuales domésticas de diversas regiones en México (en mg/l, excepto los indicados).

Constituyentes	Norte	Centro	Golfo Y Sureste	D.F.
pH	7.1	7.2	7.1	7.4
Temperatura (°C)	15	26	25	-
Sólidos totales	1545	1132	978	1015
disueltos totales	1326	816	740	858
disueltos fijos	974	524	445	472
disueltos volátiles	352	292	295	386
suspendidos totales	219	316	238	159
suspendidos fijos	105	88	78	64

suspendidos volátiles	114	228	160	95
Sólidos sedimentables ml/l	1.6	8.7	7.2	1.82
DBO ₅ , 20°C	229	326	159	245
COT	-	-	-	-
DQO	462	684	307	587
Nitrógeno total	40	41	27	20
orgánico	17	12	11	11
amoniacal	23	29	16	9
de nitritos y de nitratos	-	-	-	-
Fósforo total	23	13	36	9
orgánico e inorgánico	-	-	-	-
SAAM	11.9	9.8	17.6	10.2
Cloruros	-	-	-	-
Alcalinidad, como CaCO ₃	-	-	-	-
Grasas y aceites	46	60	58	97
DQO/DBO	2.02	2.10	1.93	2.40
SST/ST	0.14	0.28	0.24	0.16
SVT/ST	0.30	0.46	0.47	0.47
SSV/SST	0.52	0.72	0.67	0.60
SSV/SVT	0.24	0.44	0.35	0.2
DBO:N:P	100:17:10	100:12:4	100:17:23	100:8:3.9

FUENTE: ROMERO, 1991.

Una composición típica del agua residual municipal se muestra en la figura 4.

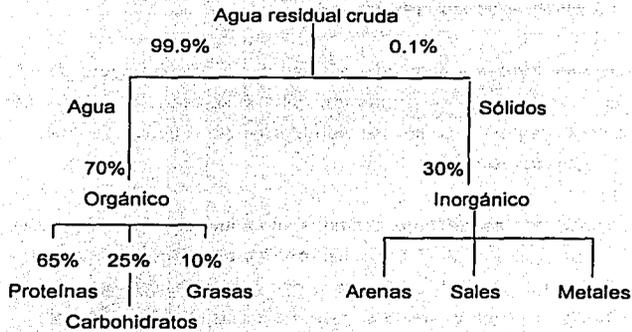


Figura 4 Composición del agua residual, (Romero, 1991).

1.5 Enfermedades humanas transmitidas por el agua.

Debido a la importancia que tiene el agua en la vida del hombre, si está contaminada, se convierte en un medio con gran potencial para transmitir una amplia variedad de males y enfermedades. En el mundo desarrollado las enfermedades hídricas son raras, lo que se debe esencialmente a la presencia de sistemas eficientes de abastecimiento de agua y eliminación del agua residual. Sin embargo, en el mundo en vías de desarrollo, millones de personas no cuentan con abastecimiento de agua seguro y saneamiento adecuado. Como resultado, las enfermedades hídricas alcanzan cifras importantes.

Existe preocupación por los posibles riesgos para la salud que pueden surgir a largo plazo por la presencia de pequeñas concentraciones de impurezas en el agua para beber, en especial de compuestos potencialmente cancerígenos. También hay varios contaminantes, de origen natural o producidos por el hombre, que tienen efectos adversos a la salud de quienes la consumen.

Estas enfermedades hídricas son en las cuales el patógeno, es decir, un agente o microorganismo productor de enfermedad, ingresa al cuerpo como un componente pasivo del agua ingerida.

1.5.1 Características de las enfermedades.

Todas las enfermedades requieren para su diseminación un foco de infección, una ruta de transmisión y la exposición de un organismo vivo susceptible a la enfermedad. Las medidas ingenieriles relacionadas con el control de las enfermedades tienen que ver esencialmente con la ruptura de la ruta de transmisión.

Las enfermedades contagiosas humanas son aquellas en las que el patógeno pasa su vida en el hombre y sólo puede vivir corto tiempo fuera del cuerpo, donde el ambiente le es desfavorable. Este tipo de enfermedad se transmite por contacto directo. En las enfermedades no contagiosas el patógeno pasa parte de su ciclo de su vida fuera del cuerpo humano, de manera que el contacto directo no es de gran importancia.

Las enfermedades no contagiosas tienen rutas de transmisión simples en las que el desarrollo extracorpóreo del organismo infectante tiene lugar en el suelo o en el agua. Sin embargo en muchos casos, las rutas de transmisión son más complejas y requieren un huésped intermedio como parte del desarrollo del parásito. Por esto, es importante que se establezcan medidas de control una vez que se tiene conocimiento completo de los patrones de transmisión de una enfermedad en particular.

Cuando una enfermedad siempre está presente en una población a un nivel bajo de incidencia, se le llama endémica. Si la enfermedad tiene niveles de incidencia muy variables, a los niveles pico se les llama epidemias y a los brotes mundiales se les denomina pandemias.

Las enfermedades transmitidas por el agua pueden además categorizarse como aquellas originadas por organismos microbiológicos y aquellas producidas por sustancias tóxicas inanimadas suspendidas o disueltas en el agua.

Una diferencia importante entre las dos subcategorías es que las enfermedades producidas por organismos microbiológicos generalmente se manifiestan en los individuos en episodios agudos, mientras que las producidas por sustancias químicas tóxicas pueden manifestarse tanto en forma aguda como en forma acumulativa crónica, dependiendo de su concentración en el agua.

1.5.1.1 Transmisión microbiológica: fecal – oral.

Las enfermedades hídras más comunes ciertamente las que causan el mayor daño a escala global son aquellas que se propagan por el agua contaminada con excretas humanas (o enfermedades zoolíticas, propagadas por excretas de animales) (Tabla 11), evacuadas por alguien con una infección. Esa persona puede estar enferma o ser un "portador". La mayoría de las enfermedades de esta categoría, se caracterizan porque enferman simultáneamente a varias personas que toman de la misma fuente de agua, así como su manifestación en el tracto intestinal, es decir, son entéricas. El síndrome más frecuente es la diarrea, es decir, disposiciones sueltas frecuentes. El agente patógeno puede ser uno de los muchos organismos candidatos incluyendo a los virus. Estas enfermedades pueden propagarse a otras partes del cuerpo.

Tabla 11 *Enfermedades transmitidas por el agua: fuentes microbiológicas.*

<i>Fuentes microbiológicas</i>	<i>Vías de tipo fecal – oral</i>
Disentería amébrica (Amebiasis)	Epidémicamente es transmitida a través del agua, alimentos y contacto mano-a-boca. Es resistente a la cloración.
Ascariasis (Lombriz gigante)	Generalmente transmitida a través del suelo, pero también en ocasiones por el agua.
Disentería bacilar (Shigellosis)	También a través de comidas, leche, moscas y contacto directo.
Disentería balantidial (Balantidiasis)	Epidémicamente, principalmente a través del agua. Endémicamente, a través de agua, comida y moscas.
Enteritis campilobacteriana	Sólo recientemente se le ha reconocido como una causa importante de la diarrea pediátrica.
Cólera (Clásico y El tor)	Enfermedad clásica transmitida por el agua. Actualmente pandémica. Alto índice de mortalidad en los casos no tratados.
Coccidiosis	Rara, benigna.
Diarreas (Incluye diarreas infantiles y gastroenteritis)	Síndromes clínicos de etiología variada, generalmente no identificada, ataca

E. coli (Enteroinvasiva, enteropatógena y enterotóxica)	especialmente en los países menos desarrollados donde aparece con frecuencia como una de las principales causas de muerte. Principalmente de vía fecal-oral.
Virus entéricos	Creciente comprensión de su rol en las diarreas de niños y viajeros. Muchos son patógenos. Su rol no es bien comprendido. Pueden causar enfermedades del sistema nervioso central.
Giardiasis	Recibe cada vez mayor atención. Es resistente a la cloración.
Virus de hepatitis A.	Varias rutas de transmisión. Incluyendo la fecal-oral.
Anquilostomiasis y Estrongiloidiasis	Normalmente, la larva del suelo penetra en la piel desnuda, generalmente del pie. También puede transmitirse por agua.
Enfermedad hidatídica (Echinococcosis)	Se transmite mediante la ingestión de huevos infectados en agua y alimentos contaminados por heces de perros.
Otros vibriones aparte del cólera	Cada vez más reconocidos como una causa de diarreas
Infección viral Norwalk	Aparentemente, una causa significativa de diarreas
Fiebre paratifoidea	Contacto directo o indirecto con heces y orina de paciente o portador. Generalmente se propaga indirectamente a través de alimentos, Se ha observado transmisión vía agua, pero es rara.
Poliomielitis	Agente de diarrea infantil recientemente identificado. Probablemente fecal-oral.
Infección de rotavirus	Enfermedad gastroentérica aguda, infecciosa; generalmente se propaga a través de alimentos contaminados fecalmente.
Salmonelosis	

Esquistosomiasis	Puede transmitirse a través del agua, pero la penetración por la piel es la puerta principal de entrada.
Diarrea de viajeros	Frecuentemente causada por uno de los muchos serotipos de bacteria E.coli.
Tricuriasis (Lombriz latigoforme)	Generalmente se transmite por el suelo, pero ocasionalmente también por el agua.
Fiebre tifoidea	Se transmite a través de agua y alimentos contaminados. Los portadores urinarios son frecuentes en áreas con S. Hematobium.
Yersinosis	De alcance mundial, pero escasamente reconocida.

FUENTE: OPS

1.5.1.2 Transmisión por insectos relacionados con el agua.

Existen varias enfermedades propagadas por insectos que se multiplican o se alimentan cerca del agua y su incidencia se relaciona con la proximidad de fuentes de agua adecuadas (Tabla 12). La infección de estas enfermedades no está relacionada con el consumo humano del agua o con su contacto. Los mosquitos o moscas por ejemplo, proliferan en el agua estancada y poco profunda, en las orillas de los lagos y en las estructuras en donde se almacena agua. Normalmente se controla su propagación con insecticidas que se vierten en las mismas aguas o en las estructuras que sirven de hábitat.

Tabla 12 *Enfermedades transmitidas por el agua.*

<i>Enfermedad o síndrome</i>	<i>Observaciones</i>
Antrax	Transmisión por agua potable, dudosa, aunque citada por varios autores.
Brucelosis	Documentada, pero probablemente muy escasa.
Cisticercosis (Lombrices de la vejiga)	Ingestión de los huevos a través de alimentos o agua. Infección larval con <i>T. solium</i> enfermedad grave.
Gongilonomiasis (Lombricilla filiforme escutiforme)	Rara. Ingestión de agua que contiene larvas de insectos huéspedes desintegrados.
Filariais (Dracontiasis)	Ruta de transmisión compleja con vector intermedio (ciclopodo). Se transmite sólo por agua.
Sanguijuelas (Hirudiniasis)	Infestación a través de sanguijuelas acuáticas de corta edad.
Leptospirosis (Enfermedad de Weil)	Una zoonosis. Su transmisión más frecuente es por el contacto de la piel con agua contaminada.
Enfermedad del tremátodo (Clonorchiasis y otras)	Ocasionalmente por ingestión de agua potable que contiene metacercaria de pescado descompuesto. La mayoría de casos se da por comer pescado crudo.
Melioidosis	Rara. Sudeste asiático.
Sparganosis	Ingestión de agua que contiene ciclopodos infectados con ciertas larvas cestodas.
Tularemia	Ingestión de agua no tratada de cuencas donde dicha infección predomina entre los animales silvestres; los conejos constituyen uno de los varios mecanismos de transmisión.

FUENTE: OPS

1.5.1.3 Transmisión mediante agentes químicos o físicos.

Hay muchos compuestos químicos cuya presencia en el agua podría ser dañina o mortal para la vida humana causada por la ingestión de agua (Tabla 13).

Existen dos aspectos de este problema. Uno de ellos es el efecto agudo que podría producirse por la descarga accidental en el agua de suficiente materia tóxica como para producir síntomas más o menos inmediatos a los consumidores. El otro efecto que es un tipo más insidioso de contaminación química, ocurre cuando el contaminante se convierte en un riesgo a largo plazo debido a que la exposición es en pequeñas concentraciones, tal vez durante muchos años. Muchas de las sustancias químicas tóxicas provienen de actividades del hombre, como la fumigación con pesticidas, o de forma natural como el arsénico, poco frecuente afortunadamente.

Tabla 13 *Enfermedades transmitidas por el agua: fuentes químicas y otras.*

<i>Fuente</i>	<i>Enfermedad o síndrome</i>	<i>Observaciones</i>
Metales	Toxicosis	Ingestión de metales (provenientes de fuentes naturales o de actividades humanas) con el agua potable, los alimentos o el aire. Estos incluyen arsénico, cadmio, cobre, cromo, plomo, mercurio, selenio y otros.
Productos químicos orgánicos	Toxicosis, cánceres, mutaciones y defectos congénitos	Ingestión de ciertos productos químicos, especialmente sustancias químicas orgánicas sintéticas, incluyendo algunos pesticidas.
Radionúclidos	Cánceres	Radioactividad natural y artificial.
Dureza	Enfermedades cardiovasculares	Cierta evidencia epidemiológica indica

Otras	Fluorosis	<p>correlación inversa entre enfermedades cardiovasculares y la dureza del agua potable.</p> <p>Daño producido en los dientes y en los huesos como resultado de la ingestión a largo plazo de altas concentraciones de fluoruros naturales.</p>
	Metahemoglobinemia	<p>Grave, conduce al envenenamiento mortal en los niños que ingieren agua de pozos con contenido de nitratos (NO_3) en concentraciones mayores de 45 mg/l.</p>
	<p>Bocio endémico, asbestosis y mesotelioma</p> <p>Hipertensión</p>	<p>Agua deficiente en yodo o con bociógenos.</p> <p>Se requiere dietas bajas en sodio para ciertos sectores de la población.</p>

FUENTE: OPS.

1.6 Bases del tratamiento de las aguas residuales municipales.

Independientemente de su origen, el agua una vez usada y transformada en agua residual es vertida a los sistemas de drenaje y colección para ser descargada finalmente a un río u otro cuerpo receptor, en donde al entrar en contacto con factores físicos químicos y biológicos propios del cuerpo receptor, empieza a sufrir una serie de transformaciones, independientes de la actividad humana, que dieron como resultado final hasta hace relativamente poco tiempo, su purificación natural. Dicho fenómeno es conocido como auto purificación de las corrientes y es el resultado de

la acción conjunta de fenómenos físicos, químicos y biológicos.

No obstante, esta capacidad de auto purificación tiene un límite (capacidad de asimilación) por encima del cuál el cuerpo receptor ya no recupera sus condiciones originales, lo que da lugar a su contaminación.

Como alternativa para resolver dichos problemas y eliminar del agua los contaminantes, se idearon a principios de siglo operaciones y procesos cuya característica fundamental es acelerar, en varios órdenes de magnitud, los procesos naturales; el conjunto se denomina Tratamiento de Aguas Residuales.

El propósito del tratamiento del agua residual previo a su disposición consiste en estabilizar la materia orgánica biodegradable, eliminar los organismos patógenos y separar la materia en suspensión y flotante, de forma que al ser descargada al cuerpo receptor no interfieran con el empleo más adecuado de este.

Los tratamientos del agua pueden clasificarse de acuerdo a:

- a) la calidad del efluente obtenido del proceso u operación, denominado nivel de tratamiento, o
- b) por las características inherentes del tratamiento, es decir, si en el tratamiento se realizan reacciones químicas o biológicas u operaciones físicas o una combinación de ellas (Tabla 14).

Los métodos de tratamiento en donde predomina la aplicación de fuerzas físicas se conocen como operaciones físicas unitarias, y en los que se consigue la eliminación de contaminantes mediante reacciones químicas o biológicas se denominan procesos unitarios químicos o biológicos.

Los métodos de tratamiento pueden dividirse también según la depuración que den al agua residual en:

- a) Tratamiento primario, el cuál sólo emplea operaciones físicas, las que remueven basura,

arena, grasas, aceites, y una porción de sólidos suspendidos y materia orgánica.

- b) tratamiento secundario, en donde se encuentran los procesos químicos y biológicos que remueven la mayoría de los compuestos orgánicos biodegradables y sólidos suspendidos.
- c) Tratamiento terciario o avanzado, en el que se combinan operaciones y procesos unitarios para realizar la desinfección del agua y remover el excedente de materia orgánica y otros elementos como fósforo, nitrógeno y compuestos tóxicos.

En las plantas de tratamiento, las operaciones y procesos unitarios se agrupan para constituir un tren de tratamiento con el que se logra la depuración del agua, y a sus representaciones gráficas se les nombra diagramas de bloques de procesos (figura 5).

Tabla 14 Principales procesos y operaciones unitarias usadas en los sistemas de tratamiento para la remoción de los principales contaminantes.

Contaminante	Operación o proceso unitario, o sistemas de tratamiento
Sólidos suspendidos	Sedimentación
	Tamizado y Desmenuzado
	Filtración
	Flotación
	Coagulación/Sedimentación
Orgánicos biodegradables	Lodos activados
	Filtros percoladores
	Biodiscos
	Lagunas
	Filtración intermitente
Patógenos	Cloración
	Hipocloración
	Ozonización
Nutrientes:	
	Nitrógeno

Fósforo	Intercambio iónico
Compuestos no biodegradables	Coagulación/Sedimentación
Metales pesados	Remoción bioquímica
Sólidos inorgánicos disueltos	Adsorción con carbón
	Ozonización terciaria
	Precipitación química
	Intercambio iónico
	Intercambio iónico
	Ósmosis inversa
	Electrodíálisis

FUENTE: METCALF & EDDY, 1991.

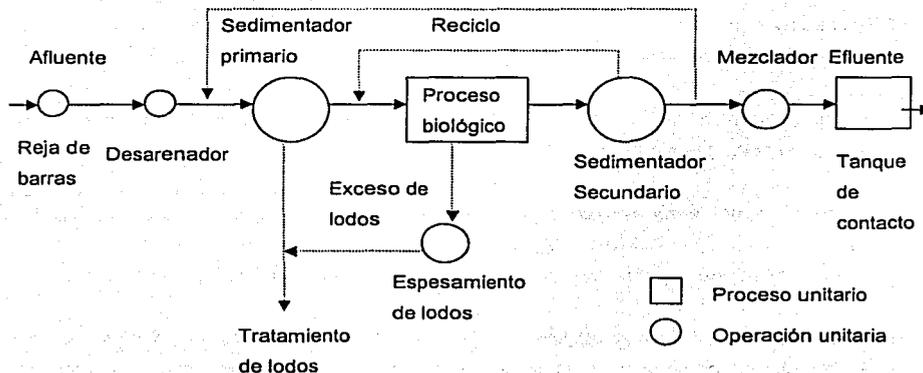


Figura 5 Ejemplo de operaciones y procesos unitarios, en un diagrama de bloques de procesos de tratamiento a nivel secundario.

1.7 Métodos de tratamiento secundario de agua residual municipal

El objetivo del tratamiento secundario o biológico es coagular y remover las sustancias orgánicas biodegradables en forma coloidal o disuelta en el agua residual, así como también la eliminación de los sólidos en suspensión al combinar diversas operaciones y procesos unitarios.

Este nivel de tratamiento depende principalmente de los microorganismos para la descomposición de los sólidos orgánicos en sólidos inorgánicos, sólidos orgánicos estables o gases, los cuales pueden ser removidos del agua por sedimentación o en el caso de los gases escapar a la atmósfera. El tratamiento biológico también es usado para remover nutrientes como el nitrógeno y el fósforo del agua residual. Con un apropiado análisis y control ambiental, casi todas las aguas residuales pueden ser tratadas biológicamente.

A continuación se describen algunos términos para facilitar su comprensión:

- Desnitrificación, es el proceso biológico en el cuál el nitrato es convertido en nitrógeno y otros productos finales gaseosos.
- Desnitrificación anóxica, es el proceso por el cuál el nitrato de nitrógeno es convertido biológicamente en gas nitrógeno en ausencia del oxígeno.
- Eliminación de DBO carbónica, es la conversión biológica de la materia orgánica carbónica del agua residual en tejido celular y varios productos finales gaseosos, en ésta conversión, se asume que el nitrógeno presente en los diversos compuestos es convertido en amoniaco.
- Estabilización, es el proceso biológico en el que la materia orgánica de los lodos producidos en la sedimentación primaria y en el tratamiento secundario es desactivada, usualmente por conversión en gases y tejido celular. Dependiendo si la estabilización es llevada a cabo bajo condiciones aerobias o anaerobias, el proceso es conocido como digestión aerobia o anaerobia.
- Nitrificación, es el proceso biológico doble en el cuál el amoniaco es convertido primero en nitrito y después en nitrato.

Los procesos biológicos usados para el tratamiento de las aguas residuales (Tabla 15), se dividen en cuatro grupos principales, dependiendo del uso o no del oxígeno por parte de los microorganismos para la degradación de la materia orgánica, y estos son:

- a) procesos aeróbicos, que se realizan en presencia y consumo de oxígeno.
- b) procesos anaeróbicos, que suceden en ausencia del oxígeno.
- c) procesos facultativos, aquellos en que los microorganismos pueden vivir en presencia o ausencia de oxígeno.
- d) procesos anóxicos, en donde las principales reacciones están enfocadas a la desnitrificación anaerobia.

Estos procesos a su vez, pueden ser clasificados, según el medio de crecimiento de los microorganismos en:

- a) sistemas de cultivo suspendido, donde los microorganismos se encuentran en suspensión en el agua residual.
- b) sistemas de cultivo fijo, en el cuál los microorganismos se desarrollan y realizan su función adheridos a un medio rígido.

Tabla 15 Principales procesos de tratamiento biológico para el tratamiento del agua residual.

<i>Tipo</i>	<i>Nombre</i>	<i>Uso</i>		
Procesos Aerobios	Cultivo suspendido	Lodos Activados	Eliminación DBO carbonosa (Nitrificación)	
		convencional		
		tanque mezclado continuo		
		aeración de paso		
		de oxígeno puro		
		aeración modificada		
		estabilización de contacto		
		aeración extendida		
		zanja de oxidación		
		Nitrificación de crecimiento suspendido		Nitrificación
Cultivo fijo	Lagunas Aireadas	Eliminación DBO carbonosa (Nitrificación)		
		Digestión aerobia	Estabilización	
		Aire normal	Eliminación DBO carbonosa	
		Oxígeno puro	Eliminación DBO carbonosa	
		Tanque aeróbico de alto rango de algas	Eliminación DBO carbonosa	
		Filtros Percoladores	Baja tasa	Eliminación DBO carbonosa (nitrificación)
			Alta tasa	
			Filtros de desbaste o pretratamiento	Eliminación DBO carbonosa
		Sistema biológico giratorio de biodiscos	Eliminación DBO carbonosa (nitrificación)	
		Reactores de lecho compacto	Nitrificación	

FILTROS PERCOLADORES EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

Procesos Combinados	Filtros percoladores, lodos activados	Eliminación DBO carbonosa (nitrificación)
	Lodos activados, filtros percoladores	Eliminación DBO carbonosa (nitrificación)
Procesos Anóxicos		
Cultivo suspendido	Desnitrificación de cultivo suspendido	Desnitrificación
Cultivo fijo	Desnitrificación de cultivo fijo	Desnitrificación
Procesos Anaerobios		
Cultivo suspendido	Digestión anaerobia	Estabilización,
	Tasa normal una etapa	Eliminación DBO carbonosa
	Tasa alta una etapa	
	Doble etapa	
	Proceso anaerobio de contacto	Eliminación DBO carbonosa
Cultivo fijo	Filtro anaeróbico	Eliminación DBO carbonosa estabilización (desnitrificación)
	Lagunas anaerobias	Eliminación DBO carbonosa (estabilización)
Procesos aerobios anóxicos o anaerobios		
Cultivo suspendido	Una etapa	Eliminación DBO carbonosa
	Nitrificación - desnitrificación	Desnitrificación Nitrificación
Crecimiento vinculado		
Procesos Combinados de cultivo fijo	Nitrificación - desnitrificación	Nitrificación, Desnitrificación
	Lagunas Facultativas	Eliminación DBO carbonosa
	Estanque de maduración o terciario	Eliminación DBO

	carbonosa (nitrificación)
Lagunas anaeróbicas - facultativas	Eliminación DBO carbonosa
Lagunas anaeróbicas - facultativas aerobias	Eliminación DBO carbonosa

FUENTE: METCALF & EDDY, 1991.

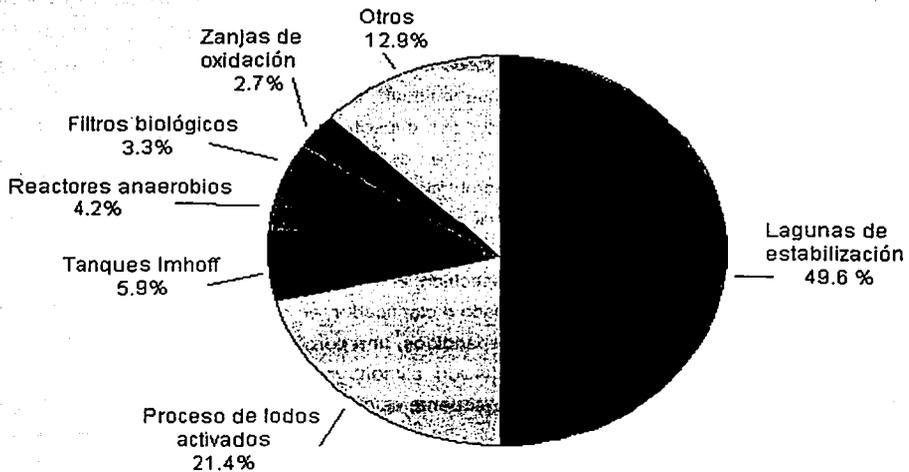
1.7.1 Descripción de los principales métodos de tratamiento secundario de aguas residuales municipales.

En diciembre del año 2000, la CNA informó que México tenía en inventario 1018 plantas de tratamiento, 18 más que en 1999, con una capacidad instalada de 75,953 lps. Se encontraban en operación 793 plantas con un gasto tratado de 45,927 lps., por lo que el 23% del volumen total de aguas residuales colectadas que proceden de las localidades urbanas a nivel nacional, que se calculaban en 200 m³/seg recibían algún tipo de tratamiento.

Dentro de los procesos utilizados en el tratamiento respecto al número de plantas inventariado, el 49.6% corresponde a lagunas de estabilización, con 499 plantas que es el proceso de mayor uso en México, además de que es una tecnología que permite el reuso del agua tratada en la agricultura.

En segundo término se utiliza el proceso de lodos activados, que representa el 21.4%, con 218 plantas; y en tercer lugar con 5.9% y con 60 plantas, el proceso de tanques Imhoff. Después en orden decreciente están: reactores anaerobios con 4.2%, filtros biológicos con 3.3%, zanjas de oxidación con 2.7% y el resto representa el 12.9%. Lo anterior se resume en la figura 6.

En cuanto a la capacidad de diseño de las plantas por tipo de proceso, los que tienen mayor capacidad son los lodos activados con 31,718 lps.; las lagunas de estabilización con 14,544 lps, primarios avanzados con 6,590 lps, y las lagunas aireadas con 5,442 lps (CNA).



Porcentaje calculado con respecto a las 1018 plantas de tratamiento.

Figura 6 *Porcentaje de métodos de tratamiento utilizados con respecto al número de plantas de tratamiento a nivel nacional, (CNA).*

Durante el 2000 se concluyó la construcción de 21 plantas de tratamiento en trece estados, una en los estados de Aguascalientes, Chiapas, Guanajuato, Guerrero, Jalisco, Nuevo León y Veracruz, dos en los estados de Chihuahua, Colima, Morelos y Quintana Roo y tres en los estados de Coahuila y Sinaloa. Estas plantas en conjunto tienen un gasto de diseño que asciende a 7,806 lps, algunas de ellas entraron en sustitución de plantas que ya no se encontraban en condiciones de operación, como fueron los casos de Cd. Acuña y Piedras Negras, en Coahuila y la de Norias de Ojo Caliente, en Aguascalientes.

I.7.1.1 Lodos activados.

Los residuos orgánicos son introducidos en un reactor donde un cultivo de bacterias aerobias es mantenido en suspensión con agua residual y aire. Al contenido del reactor se le llama licor mezclado. El aire se suministra al reactor con difusores o aireadores mecánicos, los cuales también mantienen al licor mezclado en un régimen de mezclado completo, para llevar a cabo la degradación de la materia en condiciones aerobias. Los microorganismos obtienen los nutrientes necesarios para su desarrollo del agua residual y forman el lodo activado.

Después de un periodo de tiempo específico, el licor mezclado con células nuevas y viejas es llevado a un tanque sedimentador secundario o clarificador, en donde el lodo se sedimenta para dejar un efluente con baja DBO y sólidos suspendidos, una porción de los lodos sedimentados, se retornan al reactor para mantener una relación alimento/microorganismos adecuada para la degradación de la materia orgánica, el lodo excedente es purgado del sistema.

Se han desarrollado variantes del sistema de tratamiento con lodos activados, con el fin de mejorar el proceso, disminuir los costos y producir un lodo más estable. Las principales variantes son las siguientes:

- a) Método convencional (flujo pistón). El agua residual y el lodo de recirculación entran al tanque de aireación en un extremo y son aireados con difusores o aireadores mecánicos, en la aireación se lleva a cabo la adsorción, floculación y oxidación de la materia orgánica. La salida del licor mezclado se encuentra en el extremo opuesto a la entrada
- b) Método completamente mezclado. El efluente se dispersa uniformemente en todo el tanque de aireación, de manera que se produce una demanda de oxígeno y carga orgánica uniforme en el tanque.
- c) Método de aireación extendida. Funciona en la fase de respiración endógena, requiriendo de una carga orgánica relativamente baja y un largo periodo de aireación. Produce pocos lodos y es adecuada para plantas prefabricadas.
- d) Método de estabilización por contacto. Este proceso usa la capacidad de adsorción que

tienen los lodos activados para quitar materia orgánica en solución en un tanque pequeño.

- e) Método con sistema de oxígeno puro. Se emplea oxígeno puro en lugar de aire, el cuál se distribuye con difusores en tanques de aireación cubiertos y se recicla el oxígeno.
- f) Método de zanjas de oxidación. Consiste en un canal en forma de anillo, óvalo o carrusel, equipado con aireadores mecánicos que proporcionan el oxígeno requerido y ayuda a circular el licor mezclado. Son una forma de aireación extendida con largos tiempos de retención celular e hidráulica.
- g) Método de reactor intermitente o secuencial. Consiste en sistemas de llenado – vaciado en un reactor de mezcla completa. El licor mezclado es retirado del reactor al final de cada ciclo, eliminando el clarificador secundario.

1.7.1.2 Lagunas de estabilización aerobia.

Consisten en depósitos grandes de poca profundidad excavados en el terreno natural, en donde el tratamiento del agua residual depende de algas y bacterias, existiendo dos tipos de lagunas: las productoras de algas y las productoras de oxígeno. El oxígeno es suministrado por aireación de la superficie y a través de la fotosíntesis realizada por las algas, el cuál es utilizado por las bacterias para la degradación de la materia orgánica. Los nutrientes y el dióxido de carbono producido en la degradación, son empleados por las algas.

1.7.1.3 Filtro percolador.

Consiste en un tanque que contiene un lecho formado por un medio permeable en donde se encuentran adheridos los microorganismos aeróbicos responsables de la degradación de la materia orgánica y a través del cual el agua residual se depura. Cuando los microorganismos crecen, el espesor de la película aumenta, por lo que la capa biológica se desprende cíclicamente del lecho en forma natural. Una vez que el agua a pasado por el lecho filtrante es colectada junto con los sólidos biológicos en la parte inferior y conducida a un sedimentador secundario, donde se

sedimenta el lodo generado en el proceso.

El medio filtrante consiste desde roca con tamaños de 25 mm hasta materiales sintéticos ligeros e inertes.

El reactor es generalmente circular, por lo que el agua es distribuida sobre el lecho mediante un distribuidor giratorio. Actualmente existen medios filtrantes sintéticos de diversas características, lo que da la posibilidad de tener reactores circulares con profundidades que van desde los 2.0 m hasta los 12 m.

1.7.1.4 Laguna aireada aerobia.

Este proceso es similar al de lodos activados, excepto que el reactor es un depósito excavado en el terreno y que la gran superficie de las lagunas puede dar lugar a efectos térmicos más marcados. En una laguna aireada se mantienen en suspensión sólo una parte de los sólidos, y el aire requerido por el proceso es suministrado por aireadores o difusores. La microbiología es parecida a la empleada en lodos activados. En sistemas es posible realizar una nitrificación tanto estacional como continua.

1.7.1.5 Sistema biológico giratorio o biodiscos.

Este proceso se emplea como tratamiento secundario, aunque también puede usarse para obtener una nitrificación estacional o continua. Consiste en una serie de discos circulares concéntricos de poli estireno o cloruro de polivinilo parcialmente sumergidos en agua residual, en donde los microorganismos se adhieren formando una película biológica denominada biomasa. La rotación de los discos pone alternativamente en contacto la biomasa con la materia orgánica presente en el agua residual y con la atmósfera para la adsorción del oxígeno. La rotación es así mismo, el mecanismo de eliminación del exceso de sólidos adheridos a los discos y mantienen la materia en suspensión, de manera que esta pueda ser transportada al tanque clarificador o sedimentador secundario para remover los sólidos en suspensión remanentes.

1.7.1.6 Proceso anaerobio de contacto.

Este método es empleado principalmente en la depuración de las aguas residuales industriales con alto contenido de DBO y sólidos suspendidos volátiles. Consiste en un reactor sellado que impide la entrada de aire, al cual se introducen el agua a tratar con los lodos recirculados para ser digeridos anaerobiamente. El contenido del reactor se mezcla y una vez terminada la digestión se lleva a un clarificador o unidad de flotación al vacío para separar los sólidos. El lodo sedimentado es retornado al reactor para servir de siembra al agua residual entrante y, dada la baja tasa de síntesis de los microorganismos anaerobios, el exceso de lodo a evacuar resulta mínimo.

1.7.1.7 Lagunas anaerobias.

Este proceso es empleado en el tratamiento de aguas residuales con alto contenido orgánico y concentración de sólidos, ya que logra eliminar del 70 al 85% de DBO. Está constituido por un estanque profundo excavado en el terreno, dotado de conducciones para entrada y salida de flujo. El tratamiento es anaerobio en toda su profundidad, excepto en una zona estrecha de superficie y la estabilización del agua se consigue por precipitación y conversión anaerobia de los residuos orgánicos en metano, dióxido de carbono y otros gases; así como ácidos orgánicos y tejidos celulares. Los sólidos se sedimentan en el fondo del estanque y el efluente parcialmente clarificado es conducido a un proceso de tratamiento posterior.

1.7.1.8 Lagunas facultativas.

Son estanques excavados en el terreno, en donde la estabilización de la materia orgánica se lleva a cabo bajo la acción de bacterias aerobias, anaerobias y facultativas. Para que esto se realice, el estanque está dividido en tres zonas: 1) una superficial compuesta por bacterias aerobias y algas en relación simbiótica, 2) una intermedia parcialmente aerobia y anaerobia, en donde las bacterias facultativas realizan la descomposición de la materia orgánica; 3) una inferior, en la que los sólidos acumulados son descompuestos por las bacterias anaerobias.

TEORÍA DEL PROCESO DE BIODEGRADACIÓN DE
MATERIA ORGÁNICA EN UN REACTOR BIOLÓGICO DE
CULTIVO FIJO

II. TEORÍA DEL PROCESO DE BIODEGRADACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN UN REACTOR DE CULTIVO FIJO

II.1 Fundamentos de microbiología.

Los objetivos del tratamiento biológico de las aguas residuales, son la eliminación de la DBO carbonosa, la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica, a través de una gran variedad de microorganismos, obteniendo como desechos tejido celular y gases. En el caso del agua residual municipal, el principal objetivo es reducir el contenido orgánico y, en muchos casos, la eliminación de nutrientes como el fósforo y el nitrógeno. Debido a lo anterior, es de principal importancia conocer y entender el papel de los microorganismos en el tratamiento de las aguas residuales municipales.

Los microorganismos que se encuentran en las aguas superficiales y residuales se clasifican en los siguientes grupos: protistas, vegetales y animales. Resumiéndose en la siguiente tabla.

Tabla 16 *Los tres reinos de microorganismos.*

Reino	Miembros Representativos	Caracterización
Animal	Rotíferos Crustáceos	Multicelulares con tejidos diferenciados
Vegetal	Musgos Helechos, plantas de semilla	Multicelulares con tejidos diferenciados
Protista:		Unicelulares o multicelulares,
Superiores	Algas Protozoos Hongos Mohos	sin tejidos diferenciados, contienen núcleos verdaderos (células eucariotas)
Inferiores	Algas verdiazules	Unicelulares o multicelulares,

Bacterias**sin tejidos diferenciados, no
tienen membrana nuclear
(células procariotas)**

FUENTE: METCALF & EDDY, 1991

La estructura celular de los microorganismos anteriores, en general es muy similar, ya que cuentan con una pared celular que puede ser una membrana flexible o rígida. Si son móviles, poseen por lo general flagelos o algunos apéndices de apariencia capilar. El interior de la célula contiene una suspensión coloidal de proteínas, carbohidratos, y otros compuestos orgánicos complejos, llamada citoplasma.

Cada célula contiene ácidos nucleicos, material hereditario vital para la reproducción. La región citoplasmática contiene ácido ribonucleico (ARN), cuya función principal consiste en la síntesis de proteínas, también en el interior, se encuentra la región del núcleo, que contiene ácido desoxirribonucleico (ADN), que contiene toda la información necesaria para la reproducción de todos los componentes de la célula y puede considerarse como la base de la célula.

A fin de que las células continúen con sus funciones vitales, estas deben tener una fuente de energía y de carbono para la síntesis de nueva materia celular. Dos de las fuentes más comunes del carbono celular para los microorganismos son el anhídrido carbónico y la materia orgánica. Para la adquisición de energía existen tres fuentes importantes, la luz solar, una reacción orgánica de oxidación-reducción y la oxidación o fermentación de la materia orgánica.

En cuanto a su metabolismo, los microorganismos como ya se mencionó anteriormente, se pueden clasificar según su capacidad para utilizar oxígeno. Los organismos aerobios sólo pueden existir en presencia de oxígeno molecular, los anaerobios existen solamente en un ambiente sin oxígeno, los organismos facultativos tienen la capacidad de sobrevivir con o sin oxígeno libre.

Los microorganismos de mayor importancia en el tratamiento de aguas residuales son: bacterias, hongos, algas, protozoos, rotíferos, crustáceos, y virus. Los que a continuación describiremos.

II.1.1 Bacterias.

Las bacterias son organismos protistas unicelulares, consumen alimentos solubles y por lo general se encuentran en donde haya alimentos y humedad. Su modo habitual de reproducción es por escisión binaria, aunque algunas especies se reproducen sexualmente o por gemación.

Existiendo miles de especies, su forma general coincide con algunas de estas categorías: esféricas, cilíndricas y helicoidales. Su tamaño varía mucho, va desde 0.5 a 1.0 μm de diámetro en el caso de bacterias esféricas, de 0.5 a 1.0 μm de anchura por 1.5 a 3.0 μm de longitud para las cilíndricas (bastoncillos) y 0.5 a 5 μm de anchura por 6 a 15 μm de longitud para las helicoidales (espirales). En la siguiente figura 7 se muestra una bacteria de tipo esférica.



Figura 7 Imagen de bacterias tipo *Staphylococcus*.

En general, las bacterias están compuestas por un 80% de agua y el 20% restante de materia seca, de la cual 90% es materia orgánica y el 10% es inorgánica. Como todos los compuestos que forman parte de la bacteria deben de estar presentes en el medio ambiente en el que se desarrolla la célula, la falta de cualquiera de estas sustancias limitará su crecimiento o en algunos casos, lo alterará.

Las bacterias pueden clasificarse según su metabolismo en autótrofas y heterótrofas. Las autótrofas más comunes son quimiosintéticas pero sólo pocas de ellas son capaces de efectuar la fotosíntesis. En el tratamiento biológico de las aguas residuales, las bacterias heterótrofas constituyen, en general, el grupo más importante, por su necesidad de compuestos orgánicos para obtener el carbono celular. Las bacterias autótrofas y heterótrofas pueden ser aerobias, anaerobias o facultativas.

Las bacterias heterótrofas a su vez se dividen en saprófitos y parásitos, siendo las bacterias saprófitas las que obtienen su propio suministro alimenticio de la materia orgánica muerta, a la que atacan y descomponen o desdoblan en sustancias más simples, llevando a cabo así la muy útil función de destruir la materia orgánica muerta.

Las bacterias parásitas, al ser incapaces de vivir independientemente necesitan de un ser viviente en asociación que les proporcione abastecimiento alimenticio ya elaborado, y para asegurar sus condiciones ambientales necesarias para su reproducción y crecimiento.

II.1.2 Hongos.

En ingeniería sanitaria se considera que los hongos son protistas heterótrofos, no fotosintéticos y multicelulares. Los hongos se clasifican generalmente por su modo de reproducción, se reproducen sexual o asexualmente, por escisión, gemación o formación de esporas. Los mohos u hongos verdaderos producen unidades microscópicas (hifas), que colectivamente forman una masa filamentosa llamada micelio. Las levaduras son hongos que no pueden formar un micelio, por lo tanto son unicelulares (figura 8).



Figura 8 Imagen de un hongo tipo *Phycomycete*.

La mayoría de los hongos son aerobios estrictos, con una demanda baja de nitrógeno, solo necesitan aproximadamente la mitad de lo que requieren las bacterias.

II.1.3 Algas.

Las algas son protistas unicelulares o multicelulares, autótrofos y fotosintéticos (figura 9). No son deseadas en el abastecimiento de agua porque producen malos olores y sabores desagradables. Producen oxígeno por medio de la fotosíntesis, por las noches, cuando no hay luz solar para llevarla a cabo, consumen el oxígeno en la respiración, que también se lleva a cabo en el día, sin embargo, la reacción neta es la producción de oxígeno. En un medio acuático, es notable que este tipo de sistema metabólico produzca una variación diurna del oxígeno disuelto, por lo que son vitales para la ecología del medio acuoso.

Las algas, requieren de compuestos inorgánicos para reproducirse, aparte del anhídrido carbónico, los principales nutrientes necesarios son el nitrógeno y el fósforo. También son importantes trazas de otros elementos como hierro, cobre, y molibdeno.



Figura 9 *Imagen de algas en el agua residual.*

Existen cuatro principales tipos de algas de agua dulce, los cuales se describen a continuación:

- a) Verdes (chlorophyta). Las algas son verdes, principalmente una especie de agua dulce y pueden ser unicelulares o multicelulares. Una característica que las distingue es que poseen cloroplastos, los cuales son los puntos de la fotosíntesis y consisten en estructuras rodeadas de membrana que contiene clorofila y otros pigmentos.
- b) Verdes móviles (Volvocales euglenophyta). Viven en colonias, y son de color verde brillante, unicelulares, y flageladas. La Euglena pertenece a este grupo particular de algas. Las Mastigophoras, que contienen clorofila, se incluyen con frecuencia en esta categoría.
- c) Verdiamarillas o marrón dorado (Chrysophita). Casi todas las formas de Chrysophita son unicelulares. Viven en agua dulce y su color característico es debido a los pigmentos pardoamarillos que esconden la clorofila. De este grupo de algas las más importantes son la Diatomeas, que se encuentran indistintamente en aguas saladas y dulces, y tienen una concha compuesta por sílice, que en depósitos es utilizada como filtrante.
- d) Verdiazules (Cyanophita). Las algas verdiazules son de una forma muy simple y muy semejante a las bacterias en algunos aspectos, son unicelulares, generalmente

encerradas dentro de una envoltura, y sin flagelos. Difieren de otras algas en que su clorofila no está contenida en cloroplastos sino que está repartida por toda la célula. La característica importante de estas algas es su capacidad para utilizar nitrógeno de la atmósfera como nutriente en la síntesis celular. Así pues, la eliminación de compuestos nitrogenados del agua, no eliminará la fuente de nitrógeno para estas especies de algas.

II.1.4 Protozoos.

Los protozoos son protistas móviles microscópicos y por lo general unicelulares, la mayoría de los protozoos son heterótrofos aerobios, aunque algunos pocos son anaerobios (figura 10). Los protozoos son generalmente de un orden de magnitud mayor que las bacterias y suelen consumir bacterias como fuente de energía, actuando como purificadores de los efluentes de procesos biológicos de tratamientos de aguas residuales al consumir bacterias y partículas orgánicas.

Los protozoos se dividen en los siguientes grupos:

- a) Sarcodina. Se caracteriza por sus pies falsos o pseudópodos, que utilizan para su movimiento y captura de alimento. La *Endamoeba histolytica*, causa de una enfermedad intestinal del hombre, pertenece a este grupo.
- b) Mastigophora. Caracterizados por sus flagelos, que utilizan para moverse, existiendo a su vez con y sin clorofila.
- c) Sporozoa. Son formadores de esporas y parásitos obligados. Entre estos se encuentran cuatro especies de *Plasmodium*, que causan malaria.
- d) Infusoria o Ciliata. El movimiento mediante pestañas es característico de estos protozoos, las pestañas son extremidades de tipo capilar de la membrana celular, además de funcionar para moverse, sirven para atrapar alimentos sólidos. Se subdividen en fijos y libres.

- e) Suctoria. Son protozoos que poseen largos tentáculos que usan para atrapar otros protozoos y extraer su protoplasma para su utilización.

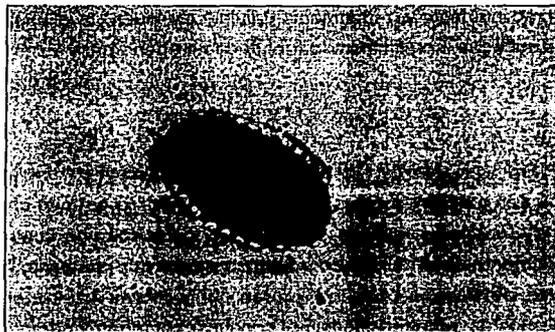


Figura 10 *Imagen de un protozoo ciliado.*

II.1.5 Rotíferos.

El rotífero es un animal aerobio, heterótrofo, y multicelular. Su nombre procede del hecho de que tienen dos juegos de pestañas giratorias sobre la cabeza que utilizan para su movimiento y captura de alimentos, los rotíferos son muy eficaces al consumir bacterias dispersas y floculadas, así como pequeñas partículas de materia orgánica. Su presencia en un efluente indica un proceso aerobio de purificación biológica muy eficiente.

II.1.6 Crustáceos.

Al igual que el rotífero, el crustáceo es un animal aerobio, heterótrofo y multicelular, pero el crustáceo tiene un cuerpo duro o coraza. Los crustáceos son una importante fuente de alimentación de los peces y como tales suelen encontrarse en la mayoría de las aguas naturales. Los crustáceos no existen en cantidades apreciables en los sistemas de tratamiento biológico. Su presencia indica que el efluente está bajo de materia orgánica y que es rico en oxígeno disuelto.

II.1.7 Virus.

Un virus es la más pequeña estructura biológica que contiene toda la información necesaria para su reproducción, los virus son tan pequeños que solo pueden verse con un microscopio electrónico. Son parásitos obligados y como tales necesitan de alguien de quien poder vivir. Una vez que lo tienen, dirigen su actividad a producir nuevos virus, eventualmente las células del huésped se rompen, liberando nuevas partículas de virus, que pueden continuar infectando nuevas células.

Una particularidad de los virus es la de poder residir en el huésped de por vida o por tiempos prolongados, de aquí la peligrosidad de un individuo que al haber sanado de una enfermedad virulenta, pueda convertirse en portador. Esta propiedad de los virus ocasiona la inmunidad a la enfermedad que produce el mismo tipo de virus.

Los virus suelen clasificarse según el huésped que infectan. Muchos virus que afectan al hombre son excretados en las heces humanas.

II.2 Crecimiento bacterial y oxidación biológica en un reactor biológico.

El tratamiento biológico de las aguas residuales se fundamenta en el conocimiento de los principios que rigen el crecimiento de los microorganismos. Debido a que las bacterias representan a los mecanismos de mayor importancia en el tratamiento biológico, es importante conocer los patrones generales de crecimiento de ellas mismas.

Un término utilizado en este tema, es el de sustrato, el cual es utilizado para representar la materia orgánica o los nutrientes que sufren una conversión o que pueden constituir un factor limitante en el tratamiento biológico.

II.2.1 Crecimiento en cultivos puros.

Las bacterias pueden reproducirse por fisión binaria, de modo sexual o por gemación. Por lo general se reproducen por fisión, es decir, por división de la célula original dando como resultado dos nuevos organismos, el tiempo requerido para cada división, que se denomina tiempo de generación, puede variar de minutos hasta días, pudiendo una bacteria producir varios millones de nuevos organismos en solo unas cuantas horas, todo esto dependiendo de las limitaciones del medio, tales como alimento, nutrientes, temperatura y tamaño del sistema.

Cuando se tiene una única población de microorganismos, el crecimiento de las bacterias puede darse en términos del número de bacterias o en términos de masa de bacterias. Para el primer modelo, se inocula un pequeño número de organismos en un medio de cultivo y se registra el número de organismos viables en función del tiempo. Este modelo tiene cuatro etapas diferenciadas (figura 11), a saber:

- a) Fase de retardo. Tras la adición de un inóculo a un medio de cultivo, la fase de retardo representa el tiempo requerido para que los organismos se aclimaten a sus nuevas condiciones ambientales.
- b) Fase de crecimiento logarítmico. Durante este período, la célula se divide a una velocidad determinada por su tiempo de generación y su capacidad de procesar alimento (tasa constante de crecimiento porcentual).
- c) Fase estacionaria. En este caso la población permanece estacionaria. Las razones que se apuntan para este fenómeno son: que las células han agotado el sustrato o nutrientes necesarios para el crecimiento, y que el crecimiento de nuevas células se nivela por la muerte de células viejas.
- d) Fase de muerte logarítmica. Durante esta fase, la tasa de muerte de las bacterias excede la producción de células nuevas. La tasa de muertes generalmente es función de la población viable y de las características ambientales. En algunos casos, la fase de muerte logarítmica es el inverso de la fase de crecimiento logarítmico.

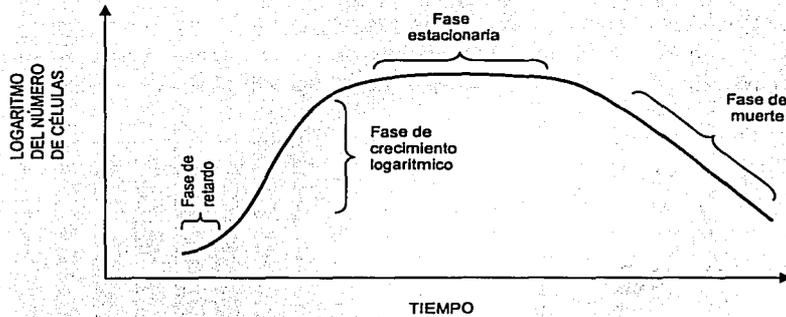


Figura 11 Curva de crecimiento bacteriano típica.

El segundo modelo de crecimiento, puede discutirse según sea la variación con el tiempo de la masa de microorganismos. Este modelo de crecimiento se subdivide en tres fases:

- Fase de crecimiento logarítmico. Siempre hay una cantidad excesiva de alimento alrededor de los microorganismos; la tasa de metabolismo y crecimiento es solamente función de la capacidad de los microorganismos en procesar el sustrato.
- Fase de crecimiento decreciente. La tasa de crecimiento y por lo tanto la masa de bacterias, disminuye por limitaciones en la disponibilidad de alimento.
- Fase endógena. Los microorganismos se ven forzados a metabolizar su propio protoplasma sin reposición del mismo, ya que la concentración de alimento disponible se halla en un mínimo. Durante esta fase, puede presentarse el fenómeno llamado lisis, según el cual los nutrientes que quedan en las células muertas se difunden con objeto de proporcionar alimento a las células existentes (crecimiento críptico).

II.2.2 Crecimiento en cultivos mixtos.

Las unidades de tratamiento biológico se componen de complejas poblaciones biológicas mezcladas e interrelacionadas, en las que cada microorganismo del sistema tiene su propia curva de crecimiento, la posición y forma de una curva en particular de crecimiento en el sistema en función del tiempo, depende del alimento y nutrientes disponibles y de factores ambientales (figura 12).

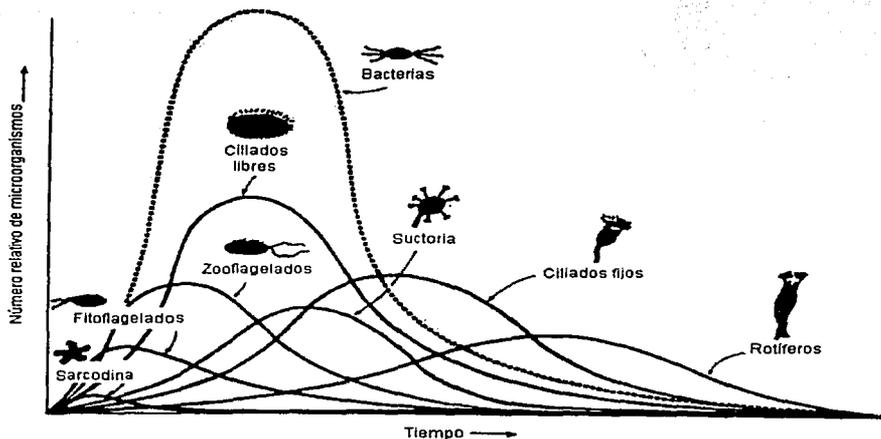


Figura 12 Curva de crecimiento relativo de los microorganismos en el curso de estabilización de un residuo orgánico en un medio líquido.

II.2.3 Cinética del crecimiento biológico.

Para que los microorganismos lleven a cabo los objetivos del tratamiento biológico de las aguas residuales, se les debe permitir su crecimiento y permanencia en el sistema de tratamiento por el tiempo suficiente para que estas se reproduzcan. Este periodo depende de la tasa de su crecimiento, la cual está en relación directa con la tasa a la que metabolizan o utilizan el residuo, lo

cual, a continuación se describe.

II.2.3.1 Crecimiento logarítmico: Cultivo de alimentación discontinua.

En este tipo de cultivo, las bacterias aumentan en proporción a su masa en la fase de crecimiento logarítmico. La tasa de crecimiento para esta fase se define por la siguiente relación:

$$(01) \quad r_g = \mu X$$

donde r_g = tasa de crecimiento bacteriano, masa / unidad de volumen * tiempo.

μ = tasa de crecimiento específico, tiempo⁻¹.

X = concentración de microorganismos, masa / unidad de volumen.

Para un sistema de alimentación discontinua, la tasa de crecimiento es:

$$(02) \quad \frac{dX}{dt} = r_g X$$

Por consiguiente, la relación siguiente es también válida para un reactor de alimentación discontinua.

$$(03) \quad \frac{dX}{dt} = \mu X$$

II.2.3.2 Crecimiento con limitación de sustrato.

Tomando como referencia el cultivo discontinuo, si unos de los elementos esenciales (sustrato y nutrientes) para el crecimiento estuvieran presentes sólo en cantidades limitadas, el mismo sería agotado en primer lugar y cesaría el crecimiento. En un cultivo continuo, el crecimiento

está limitado. Para esto, se ha encontrado que el efecto de un sustrato o nutriente limitante puede definirse adecuadamente por medio de la expresión siguiente tal como lo propuso Monod:

$$(04) \quad \mu = \mu_m \frac{S}{K_s + S}$$

donde μ = tasa de crecimiento específico, tiempo⁻¹.

μ_m = tasa de crecimiento específica máxima, tiempo⁻¹.

S = concentración del sustrato limitante del crecimiento en disolución, masa / unidad de volumen.

K_s = constante de velocidad mitad, concentración del sustrato para la mitad de la tasa máxima de crecimiento, masa / unidad de volumen.

Si se sustituye el valor de la ec. (4) en (1), tenemos la expresión resultante para la tasa de crecimiento:

$$(05) \quad r_s = \frac{\mu_m X S}{K_s + S}$$

II.2.3.3 Crecimiento celular y utilización del sustrato.

En el sistema de cultivo de alimentación discontinua, una parte del sustrato se transforma en nuevas células y otra se oxida y da origen a productos finales inorgánicos y orgánicos. Dado que se ha observado que la cantidad de nuevas células producidas es la misma para un sustrato determinado, se ha desarrollado la siguiente relación entre el grado de utilización del sustrato y la tasa de crecimiento.

$$(06) \quad r_g = -Yr_{su}$$

donde r_g = tasa de crecimiento bacteriano, masa / unidad de volumen * tiempo.

Y = coeficiente de producción máxima medido durante cualquier periodo finito de la fase de crecimiento logarítmico, definido como la relación entre la masa de células formadas y la masa de sustrato consumido, masa / masa.

r_{su} = grado de utilización del sustrato, masa / unidad de volumen * tiempo.

Si se sustituye el valor de r_0 de la ec. (5) en la ec. (6), el grado de utilización del sustrato puede definirse como sigue:

$$(07) \quad r_{su} = -\frac{\mu_m X S}{Y(K_s + S)}$$

En la ec. (7), el término μ_m / Y se sustituye por el término κ , definido como la tasa máxima de utilización del sustrato por unidad de masa de microorganismos:

$$(08) \quad \kappa = \frac{\mu_m}{Y}$$

Si se sustituye este término en la ec. (7), tenemos la siguiente expresión:

$$(09) \quad r_{su} = -\frac{\kappa X S}{K_s + S}$$

II.2.3.4 Efectos del metabolismo endógeno.

En los sistemas bacterianos utilizados en el tratamiento del agua residual, la distribución de edades de las células es tal que no todas las células del sistema están en la fase de crecimiento logarítmico. Por lo tanto, la expresión de la tasa de crecimiento debe corregirse para tener en cuenta la energía necesaria para el mantenimiento celular, así como la muerte y depredación. En general, estos factores se consideran juntos y se supone que la disminución de la masa celular causada por ellos, es proporcional a la concentración de organismos presentes.

Esta disminución se identifica a menudo como descomposición endógena, el cual puede formularse de la siguiente manera:

$$(10) \quad r_d \text{ (Descomposición endógena)} = -k_d X$$

donde k_d = coeficiente de descomposición endógena, tiempo⁻¹.

X = concentración de células, masa / unidad de volumen.

Cuando la ec. (10) se combina con las ec. (5) y (6), se obtienen las siguientes expresiones para la tasa neta de crecimiento celular:

$$(11) \quad r'_g = \frac{\mu_m X S}{K_s + S} - k_d X$$

$$(12) \quad r'_g = -Y r_{su} - k_d X$$

donde r'_g = tasa neta de crecimiento bacteriano, masa / unidad de volumen* tiempo.

La expresión correspondiente para la tasa neta de crecimiento específico viene dada por la siguiente ecuación:

$$(13) \quad \mu' = \mu_m \frac{S}{K_s + S} - k_d$$

donde μ' = tasa neta de crecimiento específico, tiempo⁻¹.

Los efectos de la respiración endógena sobre la producción neta de bacterias se tienen en cuenta al definir una producción observada como sigue:

$$(14) \quad Y_{obs} = -\frac{r'_g}{r_{su}}$$

II.2.4 Oxidación bacteriana

La conversión de materia orgánica en productos gaseosos finales y tejido celular puede llevarse a cabo por vía aerobia, anaerobia o facultativa, utilizando sistemas de cultivo en suspensión o fijo. La conversión aerobia de la materia orgánica en el cultivo de alimentación discontinuo visto previamente, puede explicarse según el siguiente esquema:

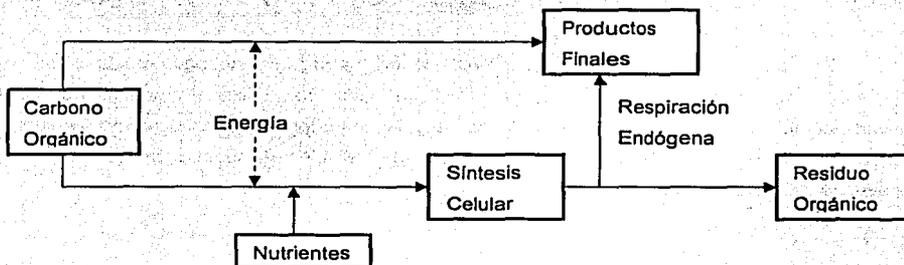
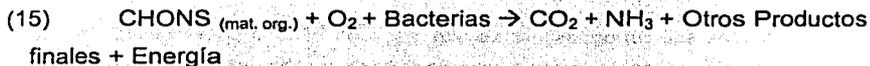


Figura 13 Representación esquemática del metabolismo bacteriano heterótrofo.

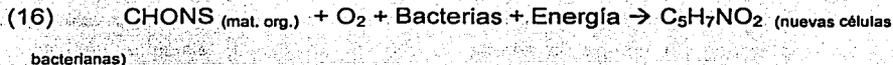
Donde se observa, una fracción de la materia orgánica se oxida dando lugar a productos finales. Este proceso se lleva a cabo para obtener la energía necesaria para la síntesis de nuevo tejido celular. En ausencia de materia orgánica, el tejido celular sería utilizado endógenamente, produciendo productos gaseosos finales y materia residual, para obtener energía para el mantenimiento de las células.

En la mayoría de sistemas de tratamiento biológico estos tres procesos tienen lugar simultáneamente, los cuales se pueden representar como sigue para un proceso aerobio:

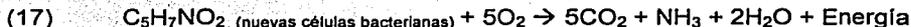
- Oxidación (proceso disimilatorio):



- Síntesis (proceso asimilatorio):



- Respiración endógena (auto oxidación):



En estas ecuaciones, CHONS representa la materia orgánica del agua residual. La fórmula $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$ que representa el tejido celular, es un valor generalizado obtenido de estudios experimentales. A pesar de que la reacción de respiración endógena se revela como formadora de productos finales relativamente simples y de energía, también da lugar a productos orgánicos finales de carácter estable.

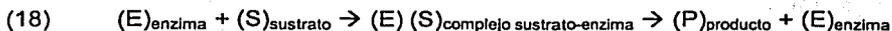
II.2.4.1 Enzimas.

El proceso por el que los microorganismos crecen y consiguen energía es complejo, existen muchas vías y ciclos. Las enzimas -catalizadores orgánicos producidos por la célula viviente- son vitales para las reacciones implicadas en dichas vías y ciclos. Las enzimas son proteínas o proteínas combinadas con una molécula inorgánica o una molécula orgánica de bajo peso molecular, como catalizadores, las enzimas pueden aumentar en gran medida la velocidad de las reacciones químicas sin alterarse.

Existen dos tipos generales de enzimas, extracelulares e intracelulares. Cuando el sustrato o nutriente requerido por la célula no es capaz de penetrar la pared de la célula, la enzima extracelular convierte el sustrato o nutriente en una forma tal que pueda ser transportada al interior de la célula. Las enzimas intracelulares contribuyen a la fotosíntesis y reacciones de energía dentro de la célula.

Las enzimas son conocidas por su alto grado de eficacia para convertir el sustrato en productos finales. Una molécula de enzima puede convertir mucha molécula de sustrato por minuto

en productos finales. También se conocen por su alto grado de especificidad respecto del sustrato, lo que indica que la célula tiene que producir una enzima diferente por cada sustrato que utiliza. Una reacción enzimática puede representarse por la siguiente ecuación general:



Como se observa, la enzima funciona como un catalizador formando un complejo con el sustrato, el cual es seguidamente transformado en un producto y en la enzima original, aquí, el producto puede ser atacado por otra enzima, pudiendo formarse una secuencia de complejos y productos antes de que se produzca el producto final. En una célula viva, la transformación del sustrato original en el producto final se consigue por un sistema enzimático de este tipo.

II.2.4.2 Procesos disimilatorios y asimilatorios.

En conjunto con las enzimas, se requiere energía para que se lleven a cabo las reacciones bioquímicas de la célula. En la célula se libera energía mediante oxidación de la materia orgánica o inorgánica, o por reacción fotosintética.

La energía liberada es capturada y almacenada en la célula por ciertos compuestos orgánicos, siendo el compuesto de almacenamiento más frecuente el adenosin trifosfato (ATP). La energía capturada por este compuesto se utiliza para la síntesis, movilidad y mantenimiento de la célula.

Cuando la molécula de ATP ha consumido su energía en las reacciones de la síntesis y mantenimiento de la célula, cambia a un estado descargado llamado adenosin difosfato (ADP). Esta molécula de ADP puede entonces capturar la energía liberada en la ruptura de la materia orgánica e inorgánica. Una vez conseguida, el compuesto adopta de nuevo un estado energético, como molécula de ATP.

El sistema de energía celular ADP-ATP se muestra en la siguiente figura.

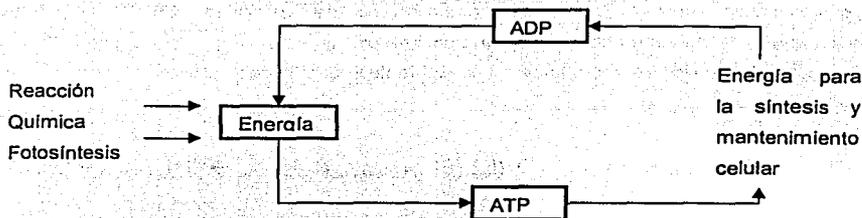


Figura 14 Representación esquemática del sistema ADP-ATP de transferencia de energía celular.

En este contexto, los procesos disimilatorios pueden considerarse que son los procesos asociados con la producción y/o captación de energía, en tanto que los procesos asimilatorios son aquellos asociados con la producción de tejido celular.

Las reacciones bioquímicas simplificadas que liberan energía para las bacterias heterótrofas y autótrofas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 17 Reacciones bioquímicas exotérmicas típicas.

Reacción energética bioquímica	Nutrición de la bacteria
$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$	Heterótrofa, aerobia
$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CH_4 + 3CO_2$	Heterótrofa, anaerobia
$2NH_4 + 3O_2 \rightarrow 2NO_2^- + 2H_2O + 4H^+$	Autótrofa, quimiosintética, aerobia
$5S + 2H_2O + 6NO_3^- \rightarrow 5SO_4^{2-} + 3N_2 + 4H^+$	Autótrofa, quimiosintética, anaerobia

FUENTE: METCALF & EDDY, 1991.

El metabolismo total de las células bacterianas consiste en dos reacciones químicas: de energía y síntesis. La primera reacción libera energía de modo que puede proseguir la segunda reacción de síntesis celular. Ambas reacciones son el resultado de numerosos sistemas dentro de

la célula y cada sistema consiste en muchas reacciones catalizadas por enzimas.

La energía liberada en la reacción de energía es capturada por el sistema catalizado por enzimas que incluye el ATP y transferida entonces, a través de este, a la reacción deficitaria de energía que es la reacción de síntesis.

Como quiera que la materia orgánica del agua residual sea limitada habrá una disminución de la masa celular debido a la utilización de materia celular sin sustitución. Si esta situación continuase, todo lo que quedaría de la célula sería un residuo orgánico relativamente estable. Este proceso general de disminución neta de la masa celular se denomina respiración endógena.

Su papel en el flujo de energía y de carbono para los organismos autótrofos y heterótrofos se muestra en la figura 13 y en la siguiente.

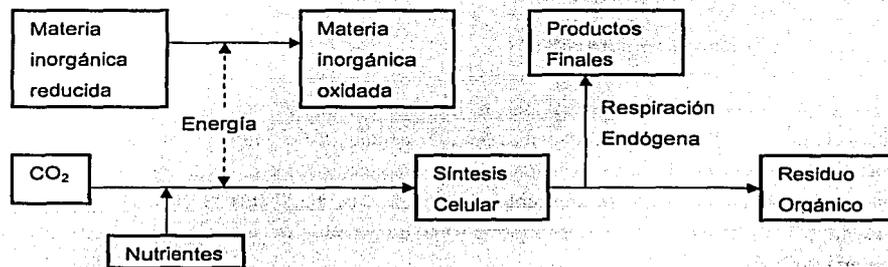


Figura 15 Representación esquemática del metabolismo bacteriano quimiosintético y autótrofo.

Cuando un organismo autótrofo sintetiza nuevo material celular, la fuente de carbono es el anhídrido carbónico. La fuente de energía para la síntesis celular es la luz o bien la liberada por una reacción inorgánica de oxidación-reducción.

El flujo de carbono y energía para las bacterias autótrofas quimiosintéticas y para las

bacterias autótrofas fotosintéticas se muestra en la figura 15 y la siguiente figura.

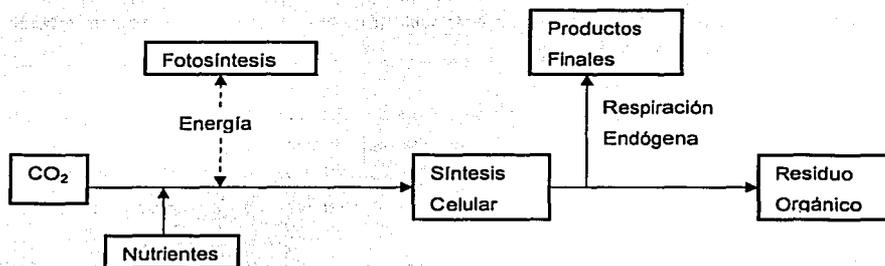


Figura 16 Representación esquemática del metabolismo bacteriano fotosintético y autótrofo.

II.2.4.3 Necesidad de nutrientes.

Los nutrientes son en ocasiones el factor limitante del crecimiento y síntesis celular en lugar del sustrato orgánico e inorgánico del agua residual, las bacterias como las algas, requieren nutrientes para el crecimiento, principalmente nitrógeno y fósforo. Estos nutrientes no siempre están presentes en cantidades suficientes. La adición de nutrientes al agua residual puede ser necesaria para el crecimiento adecuado de las bacterias y la subsiguiente degradación de la materia residual.

II.2.4.4 Ciclo aerobio.

Existen dos ciclos muy importantes que suponen el crecimiento y descomposición de la materia orgánica.

- El ciclo aerobio, en el que el oxígeno se utiliza para la descomposición de la materia orgánica.

- b) El ciclo anaerobio, en el que no se utiliza oxígeno para la descomposición de la materia orgánica.

Los elementos de nitrógeno y azufre aparecen como partes integrantes de los ciclos. Aún cuando estos dos elementos son importantes en la síntesis y descomposición de la materia orgánica, no son los únicos, y se podrían indicar otros elementos y ciclos bioquímicos.

Debe de hacerse notar que la denominación de aerobio se aplica solamente a la parte derecha de la figura 17, que es la parte de la descomposición del ciclo. Es aquí donde la materia orgánica muerta se descompone por vez primera en productos iniciales e intermedios, antes de que se produzcan los productos estabilizados finales.

En el sistema aerobio, los productos finales de degradación se oxidan más y por lo tanto quedan a un nivel menor de energía que los productos finales del sistema de degradación anaerobia. Esto explica el hecho de que se libere mucha más energía en la degradación aerobia que en la anaerobia, teniendo como consecuencia que la degradación anaerobia es un proceso mucho más lento.

La parte izquierda de la figura 17, comprende la formación o síntesis de la materia orgánica necesaria para la vida animal o vegetal.

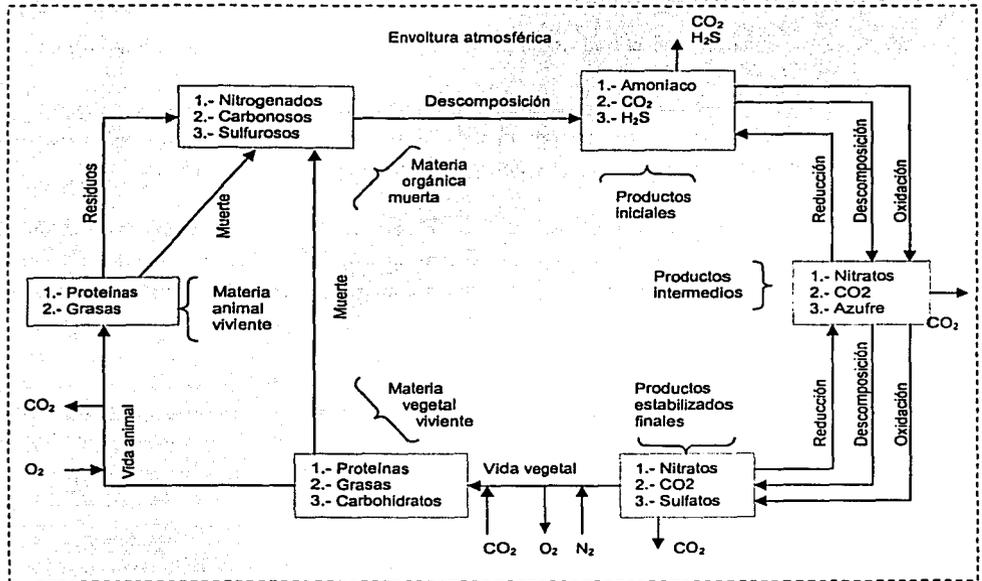


Figura 17 Representación esquemática del ciclo aerobio.

II.3 Descomposición aerobia en un sistema biológico de cultivo fijo.

El tratamiento de las aguas residuales municipales se puede efectuar en reactores de película biológica, donde el proceso de la biodegradación de la materia orgánica se lleva a cabo poniendo las aguas residuales en contacto con una población microbiana mixta, en forma de una película de lama, también llamada película biológica ó biomasa, adherida a la superficie de un medio sólido de soporte, el cual a su vez se encuentra estático. En estos sistemas biológicos de cultivo fijo se incluyen los filtros percoladores, también conocidos como biofiltros, filtros de goteo, o percoladores.

II.3.1 Descripción del proceso.

En estos sistemas, el medio sólido de soporte está dispuesto en forma de un lecho empacado a través del cual fluye el agua residual, cuando esto sucede, el oxígeno y otros nutrientes se difunden y consumen según son metabolizados dentro de la película biológica, desde la interfase de ésta con el líquido. Las materias en suspensión y las coloidales presentes en el agua residual se aglomeran y adsorben también en la película biológica. Así mismo, la materia orgánica oxidada y los productos finales inorgánicos son liberados hacia la capa de agua en movimiento para su desalojo del sistema (figura 18).

Los microorganismos presentes en la película biológica crecen, y según ésta se va engrosando y haciendo más pesada, sus regiones cercanas a la superficie sólida de soporte y más alejadas de la película de líquido, entran en una fase endógena y algunas regiones se vuelven anaeróbicas. Estas condiciones, son motivo de las causas del inicio del proceso de desprendimiento de la película biológica, ya que estas capas padecen de falta de nutrientes, mueren, se disuelven y sucede un desprendimiento de la superficie del empaque del medio de soporte, ayudadas por el peso y por el arrastre del flujo de agua residual hacia afuera del sistema, recibiendo en este momento la biomasa el nombre de humus, e iniciándose así el crecimiento de película biológica nueva, que se desarrollará a partir de los organismos presentes en las aguas residuales o inoculados a ellas.

Las condiciones anaeróbicas de la biomasa influyen en la eficiencia del tratamiento a causa de los efectos de los productos metabólicos anaeróbicos como los alcoholes, aldehídos y ácidos que se difunden hacia el exterior. Estos productos pueden inhibir la toma de nutrientes de la capa líquida por los organismos aeróbicos. Las condiciones anaeróbicas pueden también originar la formación de cavidades de gas en la película de lama, lo que acelera el proceso de desprendimiento del medio de soporte. Por lo tanto, la película de lama microbiana es autorregulante hasta cierto punto, pudiendo haber crecimientos considerables de la biomasa.

Aunque el tiempo en el que circula el agua residual por un filtro percolador es relativamente corto, cuestión de minutos, la materia orgánica adsorbida por la biomasa es retenida varias horas antes de su biodegradación.

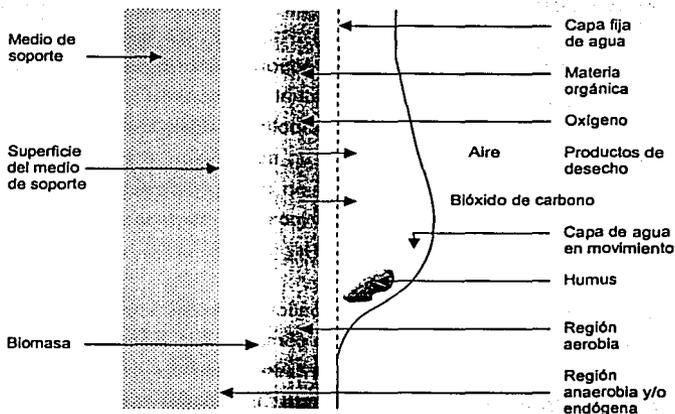


Figura 18 Representación esquemática de la sección transversal de una película biológica en un filtro percolador.

El humus desalojado del filtro percolador por medio del efluente tratado, es eliminado del efluente mediante un clarificador o sedimentador secundario. La cantidad de humus desalojado de un filtro percolador está en función de la carga hidráulica y orgánica del sistema.

II.3.2 La película de lama microbiana o biomasa.

La eficiencia del tratamiento en los filtros percoladores, alcanza un máximo cuando hay una delgada película de lama completamente aeróbica, y la eficiencia puede bajar ligeramente según aumente el espesor de la película y las regiones más profundas de la película se vuelven inactivas o anaeróbicas. Así, a pesar de que una película de lama puede tener un espesor de varios milímetros, sólo una capa exterior de 0.05 a 0.15 mm de profundidad podrá ser aeróbica.

Resultados de investigaciones han demostrado que la remoción del sustrato por una

película de lama aumenta linealmente con el incremento del espesor de la película hasta un nivel máximo donde permanece constante con aumentos adicionales del espesor de la película (Tomlinson y Saddon, 1996; Komygay y Andrews, 1968; La Motta, 1976). La profundidad de la película de lama depende de las características de las aguas residuales en tratamiento, y de la resultante ecología microbiana de la capa de lama.

El espesor de la película biológica que proporciona máxima eficiencia ha sido citado como 0.25 mm (D. Jenkins, 1963). La profundidad de la zona aeróbica ha sido estimada entre 0.06 y 0.2 mm, con la profundidad crítica de una película predominantemente bacteriana alrededor de 0.2 mm (Bruce, 1979), y entre 0.05 y 0.1 mm de profundidad aeróbica activa en un espesor total de 0.1 a 2 mm (Harris y Hansford, 1976).

En cambio, algunas aguas residuales ricas en nutrientes, como las resultantes del procesamiento de alimentos, estimulan la formación de capas biológicas espesas, predominantemente fungoides y que pueden alcanzar espesores de 5 a 8 mm, mientras se mantengan completamente aeróbicas (Williams, 1979).

El espesor de la capa biológica y la profundidad de la capa activa estarán también afectados por la carga de nutrientes en el sistema y la actividad metabólica de los organismos presentes en la película de lama. Las tasas a las cuales el oxígeno y los organismos nutrientes se difunden dentro de la película de lama, dependerán de sus respectivas concentraciones en la capa líquida en contacto con la película biológica. Cuando sea alta la concentración de nutrientes en el líquido, la fuerza impulsora de la concentración causará una rápida difusión de los nutrientes dentro de la película biológica, de manera que penetran profundamente dentro de la película biológica antes de ser consumidos.

Con muy altas concentraciones del sustrato en la capa líquida, la tasa de difusión de los nutrientes orgánicos en la película de lama puede ser más rápida que la del oxígeno necesario para su metabolismo aeróbico, de modo que la profundidad de la capa activa estará determinada por la profundidad de penetración del oxígeno. Es entonces cuando la película está limitada por el oxígeno.

Por otro lado, cuando la concentración de nutrientes en la capa líquida sea baja y los nutrientes orgánicos penetran sólo una corta distancia dentro de la película de lama antes de ser consumidos, el sistema está controlado por la disponibilidad de los nutrientes orgánicos, es decir, el sistema está controlado limitado por el sustrato.

II.3.3 Microbiología de la biomasa.

La comunidad biológica presente en un filtro percolador se compone principalmente de protistas, incluyendo bacterias facultativas, aerobias y anaerobias, hongos, algas y protozoos. Suelen encontrarse también algunos animales superiores como gusanos, larvas de insectos y caracoles. Como las aguas residuales en proceso de tratamiento cambian su composición según pasan a través del filtro percolador, los diferentes estratos del empaque estarán en contacto con líquidos de diferente composición, por lo que el equilibrio ecológico de los organismos en la biomasa variará por consiguiente dentro del percolador, permitiendo la existencia de un rango más amplio de especies y la distribución estratificada de las especies dentro del mismo contribuye a la capacidad de los percoladores para resistir cargas de choque.

Como el agua residual del fondo del filtro percolador tiene un contenido de nutrientes grandemente reducido, en esta zona se encuentran organismos autótrofos, como las bacterias nitrificantes autótrofas, *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*.

Las bacterias facultativas son los microorganismos predominantes en el filtro percolador, y junto con las bacterias aeróbicas y anaeróbicas, su misión es descomponer la materia orgánica del agua residual.

Entre las especies bacterianas asociadas con los filtros percoladores están las *Achromobacter*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, y *Alcaligenes*. Dentro de la biomasa, donde prevalecen condiciones adversas al crecimiento, existen las formas filamentosas *Sphaerotilus natans* y *Beggiatoa*.

Los hongos presentes son también los causantes de la estabilización del agua residual,

pero su contribución sólo es importante a pH bajo o con ciertas aguas industriales, tienden a predominar en los estratos superiores del percolador donde es más alta la concentración de nutrientes en la capa líquida, a veces su crecimiento puede ser tan rápido que el filtro se obstruye y se restringe la ventilación. Entre las especies de hongos que se identifican se encuentran las siguientes: *Fusarium*, *Mucor*, *Penicillium*, *Geotrichum*, *Sporotrichum* y diversas levaduras. Especialmente las primeras dos especies, son más comunes y son las que se establecen primeramente en colonias en un medio de soporte, y con gran capacidad de adherirse al mismo.

Las algas sólo pueden crecer en las capas superiores del percolador donde puede llegar la luz solar. Entre las especies comunes de algas se encuentran las siguientes: *Phormidium*, *Chlorella* y *Ulothrix*. Por lo general, las algas no toman parte directa en la degradación de los residuos, pero durante las horas diurnas añaden oxígeno al agua residual que se está tratando. Las algas pueden causar problemas cuando el excesivo crecimiento tapa el medio e interfiere con la distribución de las aguas residuales sobre el medio del percolador, y en ciertas circunstancias se puede presentar un crecimiento abundante de musgos y hepáticas, lo cual se puede evitar techando el percolador.

Los protozoarios abundan en los percoladores, predominando los ciliados incluyendo la *Vorticella*, *Opercularia* y *Epistylis*. Su función es la de controlar la población bacteriana, además de que la separación en diferentes estratos del percolador reduce la competencia entre las diferentes especies de protozoarios.

Los animales superiores como caracoles, gusanos e insectos, se alimentan de las capas biológicas del percolador, manteniendo la población bacteriana en estado de gran crecimiento o de rápida utilización del alimento, controlando también la población de larvas de insectos voladores como las moscas tipo *Psychoda* (figura 19), y evitando la acumulación de biomasa en el medio.



Figura 19 Mosca tipo *Psychoda* común en filtros percoladores.

Las poblaciones biológicas en la biomasa sufrirán variaciones en toda la profundidad del percolador en función de los cambios que se produzcan en la carga orgánica, carga hidráulica, composición del agua residual afluente, pH, temperatura, disponibilidad de aire, época del año y otros factores, que pueden resultar en el taponamiento del sistema debido al rápido crecimiento de la biomasa (encharcamiento) y a la consecuente alteración de la distribución del flujo del agua residual en el percolador a través del medio (canalización), lo que llevaría a una pérdida de eficiencia en el tratamiento del agua residual en el filtro percolador.

II.3.4 Tiempo de residencia de la biomasa.

Se puede definir como el tiempo de residencia de la biomasa como la cantidad total de sólidos en el sistema, dividida por la tasa de pérdida de sólidos del sistema. En los percoladores que funcionan a baja tasa, estos valores están sometidos a variaciones estacionales. En los sistemas que funcionan a alta tasa, donde las actividades de los macro invertebrados son menos significativas, se puede relacionar las cargas de nutrientes e hidráulicas con un tiempo medio de residencia de la biomasa. Se puede esperar que la carga de nutrientes sea la que controle el crecimiento y acumulación de la biomasa, y que la carga hidráulica controle su tasa de remoción.

Lo anterior se puede ilustrar considerando un sistema ideal de percolación de estado estacionario en el que haya crecimiento y remoción uniformes de la biomasa que resulte de un suministro constante y continuo de aguas residuales nutrientes. Si no hay acumulación de biomasa, su crecimiento estará entonces equilibrado por su remoción y muerte, dado por la

siguiente ecuación:

$$(19) \quad \text{Tasa de remoción de la biomasa} = Q_i * Y (S_i - S_e) - b * X_b * V_b$$

donde Q_i = tasa flujo ($m^3/día$).

Y = rendimiento del crecimiento de la biomasa (Kg de sólidos de biomasa / Kg de DBO).

S_i = concentración de nutrientes (g / m^3).

S_e = concentración de nutrientes residuales del efluente (g / m^3).

b = tasa de descomposición específica de la biomasa ($día^{-1}$).

X_b = concentración de la biomasa en el medio (gramos de sólidos de biomasa por m^3 de medio).

V_b = volumen del medio (m^3).

La cantidad total de sólidos de la biomasa en el medio es $V_b * X_b$, y la tasa de remoción de biomasa (g de sólidos de biomasa / día) dividida por la cantidad de sólidos de biomasa en el medio es igual al valor recíproco del tiempo de residencia de la biomasa, T_r . Dividiendo la ec. (19) por $V_b * X_b$, se tiene:

$$(20) \quad \frac{1}{T_r} = \frac{Q_i * Y (S_i - S_e)}{V_b * X_b} - b$$

Expresando la ec. (20) en términos de la carga de nutrientes y la hidráulica tenemos:

$$(21) \quad L_v = Q_1 / V_b \quad (m^3 \text{ de líquido} / m^3 \text{ (medio) - día})$$

donde L_v = carga hidráulica volumétrica.

y

$$(22) \quad L_s = Q_1 * S_1 / V_b \quad (g \text{ DBO} / m^3 \text{ (medio) - día})$$

donde L_s = carga de nutrientes.

tenemos que:

$$(23) \quad 1/T_s = Y / S_b (L_s - L_v * S_e) - b$$

Ecuación que nos muestra que el tiempo de residencia de la biomasa T_s , es casi inversamente proporcional a la tasa de carga de nutrientes L_s , según aumenta la carga de nutrientes, disminuye la edad de la biomasa ya que el crecimiento de la biomasa es estimulado.

Si se aumenta la carga hidráulica volumétrica, L_v , mientras se mantiene constante la carga de nutrientes, se tendrá entonces de la ec. (23), que aumenta el tiempo de residencia T_s de la biomasa. Sin embargo, la magnitud del efecto dependerá de los relativos niveles de las carga de nutrientes e hidráulica. Cuando es baja la carga de nutrientes, L_s , los cambios en la carga hidráulica serán más significativos que cuando la carga de nutrientes sea alta.

De lo anterior, la cantidad de materia adsorbida y aglomerada en la biomasa que haya sido estabilizada antes de que dicha biomasa abandone el percolador, dependerá entonces de la edad de la biomasa.

II.3.5 Producción de humus.

En los sistemas de baja tasa, se mineraliza una importante proporción de la DBO. La tasa de producción de humus varía notablemente con la estación. La tasa global es alrededor de 0.2 kg de sólidos de humus por kg de DBO eliminada, variando desde cerca de 0.5 kg/kg en la primavera hasta cerca de 0.1 kg/kg en el verano. En los sistemas a alta tasa, la producción de humus es más uniforme durante el año, con una tasa de producción de aproximadamente 0.35 kg de sólidos de humus por kg de DBO eliminada, pero está afectado por el contenido de sólidos de las aguas residuales influentes. El tiempo de residencia más corto de las biomosas en los sistemas de alta tasa conduce a que una menor proporción de sólidos adsorbidos sea mineralizada.

II.4 Factores ambientales que afectan la actividad microbiótica.

Las condiciones físicas ambientales en las que se mantienen los microorganismos influyen en alto grado en su proceso de desarrollo. Por lo cual, en el tratamiento de aguas residuales por procesos biológicos, para asegurar eficiencias óptimas, se deben proporcionar las condiciones ambientales apropiadas.

Los factores ambientales pueden ser clasificados como físicos, químicos y biológicos de acuerdo a su naturaleza. Los efectos de estos factores ambientales sobre la actividad microbiana son de consideración importante por lo siguiente:

- a) Es deseable mantener un cultivo para el tratamiento biológico con actividad óptima.
- b) Los factores ambientales son importantes en la evaluación de factibilidad en el tratamiento de ciertas aguas residuales por un tratamiento biológico.
- c) Los factores ambientales son importantes en la desinfección del agua potable y en los efluentes de un tratamiento biológico.

Algunos de los factores físicos ambientales más importantes que afectan la actividad microbiana son, temperatura, presión osmótica, presencia de oxígeno molecular, presencia de agua líquida, radiación ultravioleta (UV). Y de los factores químicos que afectan la actividad de los microorganismos tenemos: potencial hidrógeno (pH), presencia de ácidos y bases, presencia de agentes oxidantes y reductores, presencia de iones y sales de metales pesados, así como de ciertas sustancias químicas.

II.4.1 Temperatura.

Todos los procesos de desarrollo de los microorganismos son dependientes de reacciones químicas biológicas, de esta forma, la velocidad de su reproducción, crecimiento, y actividades metabólicas como la velocidad de transferencia de gases y características de sedimentación de los

sólidos biológicos, se ven influenciados por la temperatura en tal medida que la temperatura en el medio ambiente es casi igual a la temperatura en la células de los microorganismos, de aquí la importancia de la temperatura en el tratamiento biológico de las aguas residuales.

Para todo organismo existe una temperatura mínima para la cual no existe crecimiento, una temperatura óptima en la cual el organismo crece rápidamente, y una temperatura máxima para la cual no ocurre crecimiento. Los microorganismos se clasifican según su tolerancia a la temperatura como lo indica la siguiente tabla.

Tabla 18 *Clasificación de microorganismos según su tolerancia a la temperatura.*

Tipo	Rango de Temperatura
Psicrófilas	Temperatura óptima < 10° C.
Psicrotrófilas o Psicrófilas facultativas	Buen crecimiento bajo 10° C. pero temperatura óptima > 10° C.
Mesófilas	Temperatura óptima 10° C. - 40° C.
Termotolerantes	Temperatura óptima 45° C. - 60° C.
Termófilas	Temperatura óptima > 60° C.
Caldoactivas	Temperatura óptima >75° C.
Barotermotolerantes	Temperatura óptima < 100° C. máxima > 100° C.
Barotermófilas	Temperatura óptima > 100° C. máxima > 100° C.

FUENTE: T.J.CASEY, UNIT TREATMENT PROCESSES IN WATER AND WASTEWATER ENGINEERING. 1997.

En general, las bacterias son más sensibles al frío que al calor, se ha observado que un aumento de 10° en su temperatura, provoca un aumento al doble en su etapa de crecimiento y en su actividad metabólica. Sin embargo, si ésta temperatura es rebasada, los componentes de los microorganismos sensibles al calor, tales como las enzimas, son destruidas y la tasa de crecimiento decrece rápidamente.

También se tienen efectos opuestos, como el que la capacidad de difusión de los nutrientes y del oxígeno aumenta junto con la temperatura, pero disminuye la solubilidad del oxígeno. Las épocas del año también influyen en la eficiencia del tratamiento biológico de un filtro percolador, debido a los rangos de temperatura propia de las épocas estacionales, así como también la ubicación geográfica del sistema de tratamiento biológico.

El efecto de la temperatura sobre la velocidad de reacción de un proceso biológico se expresa generalmente de la siguiente forma:

$$(24) \quad \frac{r_T}{r_{20}} = \theta^{(T-20)}$$

donde r_T = velocidad de reacción a $T^\circ \text{C}$.

r_{20} = velocidad de reacción a 20°C .

θ = coeficiente de actividad - temperatura.

T = temperatura $^\circ\text{C}$.

En la siguiente tabla se presentan valores de θ para procesos biológicos.

Tabla 19 Coeficientes de temperatura para diversos procesos biológicos.

Proceso	Intervalo	Valor
		Típico
Lodos Activados	1.00 - 1.04	1.02
Lagunas aireadas	1.06 - 1.12	1.08
Filtros Percoladores	1.02 - 1.14	1.08

FUENTE: METCALF & EDDY, 1991

II.4.2 Presión osmótica.

La presión osmótica, que es dependiente de la concentración de sales en el ambiente en el que se encuentran los microorganismos, debe de encontrarse en ciertos rangos, ya que las células se alimentan por ósmosis. La mayoría de los microorganismos no ve afectada su actividad metabólica si la concentración de sales se encuentra en un rango de 500 a 35000 mg/l. En cuanto a la presión hidrostática, en el caso de los filtro percoladores, no se presenta este fenómeno.

II.4.3 Oxígeno molecular.

El oxígeno molecular o disuelto debe de estar presente para los microorganismos aerobios o facultativos para su actividad de respiración aerobia. Usualmente, una concentración de 2.0 mg/l es usada como valor de diseño para un reactor biológico aerobio. El oxígeno disuelto puede ser tóxico para los microorganismos aerobios cuando se presenta en una concentración supersaturada. También la presencia de oxígeno es mortal para los microorganismos anaerobios.

II.4.4 Agua líquida.

Los microorganismos deben tener agua líquida disponible para su alimentación, sin embargo, si ésta se congela en épocas frías, la actividad microbiótica disminuirá o hasta llegarán a morir los microorganismos involucrados en el tratamiento biológico.

II.4.5 Radiación ultravioleta.

La luz ultravioleta es tóxica para los microorganismos aún en bajas intensidades, así que una exposición continua y directa a la luz solar, será en perjuicio de los microorganismos presentes en la parte superior del filtro percolador.

II.4.6 pH.

Para los principales procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales, el ámbito extremo de pH para desarrollo de microorganismos está considerado entre 4.0 y 9.0, generalmente el pH óptimo para el desarrollo de los microorganismos se encuentra entre 6.5 y 7.5.

Las bacterias en el tratamiento de aguas residuales, se desarrollan mejor cuando el pH es ligeramente alcalino, mientras que las algas y hongos se desarrollan mejor cuando el pH es ligeramente ácido. A pH neutro, de 6.5 a 8.5, las bacterias predominan sobre los hongos. Para pH por debajo de 6.5 los hongos son capaces de competir con las bacterias más exitosamente. A pH entre 4.0 y 5.0, los hongos predominan totalmente con exclusión completa de las bacterias. El pH tiene efecto sobre la tasa de crecimiento de los principales microorganismos. Tal respuesta se atribuye a un cambio en la actividad enzimática por el pH.

Cuando las aguas residuales influentes al sistema de tratamiento biológico se encuentren fuera de los rangos antes establecidos, será necesaria la neutralización de dichas aguas, previo al tratamiento.

II.4.7 Ácidos y bases.

Ciertos ácidos como el ácido benzoico y ciertas bases como el hidróxido de amonio, son tóxicos para los microbios en concentraciones suficientes, provocando también cambios en el pH del agua residual afluyente al sistema que pueden no ser deseados o benéficos al sistema de tratamiento.

II.4.8 Agentes oxidantes y reductores.

Fuertes agentes oxidantes y reductores son tóxicos para los microorganismos en relativas bajas concentraciones. Todos los productos de halógeno y sus sales son muy tóxicos si el halógeno tiene una valencia por encima de la valencia baja de su estado, ya que de esta forma, es

un agente oxidante muy fuerte.

II.4.9 Iones y sales de metales pesados.

Estos elementos son tóxicos en bajas concentraciones, la toxicidad de los iones metálicos, aumenta con el incremento en su peso atómico. Los metales pesados que pueden ser encontrados en las aguas residuales son comúnmente mercurio, arsénico, cromo, zinc, cadmio, cobre, bario y níquel. Algunas ocasiones se encuentra plata ya que es usada en procesos fotográficos y de plateado, pero a consecuencia de su valor económico, usualmente es recuperada. Los jabones y detergentes son tóxicos en altas concentraciones, pero en las aguas residuales, al encontrarse mezcladas, ésta concentración resulta mínima, por lo que generalmente no afectan el sistema de tratamiento. Las grasas, si su concentración es alta, cubrirá a los microorganismos afectando su actividad aerobia. Los cianuros y amonios son tóxicos en medias y altas concentraciones. Los efectos que previamente se han mencionado, están primordialmente en función de la concentración del elemento, la temperatura, y el tiempo de contacto. Como el tiempo de contacto aumente, y generalmente la temperatura también lo haga, los efectos de toxicidad aumentarán. En concentraciones bajas no hay efectos sobre los microorganismos, si la concentración incrementa, el compuesto o elemento del que se trate estimula el crecimiento bacterial, sin embargo, un aumento mayor causará inhibición en los microorganismos, más allá de esto, causará la muerte de los organismos.

Los agentes patógenos rápidamente mueren cuando el agua residual es tratada biológicamente, a causa de que no pueden competir con los microbios existentes por alimento en el medio que prevalece en este tipo de sistemas de tratamiento. Los organismos patógenos están acostumbrados a temperaturas cercanas a los 35° C., a la presencia de sales biliares, sangre y otros factores ambientales. Si llegan a estar presentes en el efluente del tratamiento biológico, se procedería a la desinfección por medios químicos.

TIPOS DE FILTROS PERCOLADORES

III. TIPOS DE FILTROS PERCOLADORES

Los filtros percoladores han sido utilizados en el tratamiento de las aguas residuales desde la primera década del siglo pasado, desde entonces, sus principios de operación no han sufrido grandes cambios, sin embargo, en lo referente a sus estructuras, dispositivos, medios filtrantes y a la recirculación del efluente, si han tenido variaciones importantes como consecuencia del extenso estudio del proceso de biodegradación, que en conjunto con el inminente avance tecnológico, han permitido el desarrollo de nuevas técnicas y materiales que son aplicados a las teorías del funcionamiento de los filtros percoladores, resultando que actualmente exista una gran variedad de éstos. A continuación, se presentan sus elementos característicos más comunes en la actualidad.

III.1 Accesorios y dispositivos.

El filtro percolador consiste en una estructura de material granular o material de soporte a través de la cual se hace pasar un efluente de aguas residuales previamente clarificadas, mediante un sistema primario. Los filtros percoladores para tratamiento secundario constan de los siguientes aspectos básicos (figura 20):

- Sistema de distribución
- Medio filtrante
- Sistema de bajo dren
- Ventilación

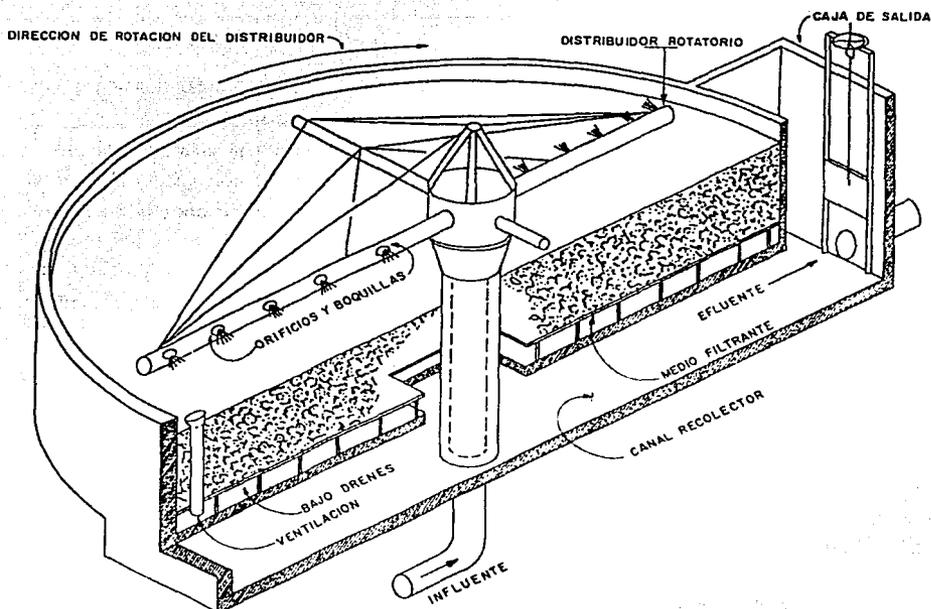


Figura 20 Elementos principales de un filtro percolador típico.

III.1.1 Sistema de distribución.

El sistema de distribución de un filtro percolador tiene por objeto uniformizar el reparto del agua residual en el medio filtrante. Fundamentalmente existen dos formas de alimentar el agua residual al filtro percolador: mediante boquillas fijas y mediante un sistema de brazos rotatorios.

El sistema de distribución de boquillas fijas está formado por un conjunto de boquillas pulverizadoras (figura 21), situadas en los vértices de una estructura de armadura espacial que cubre el lecho del filtro, la dosificación de agua residual puede ser intermitente de 3 a 5 minutos con periodos de reposo de 5 a 10 minutos. Este sistema es de poco uso debido a los requerimientos de

carga estática para operar, alrededor de 3 metros.

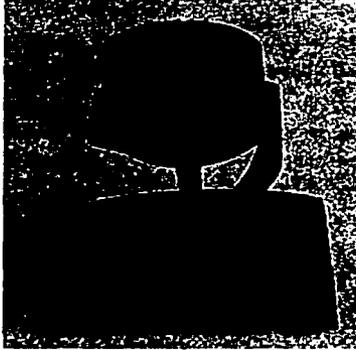


Figura 21 *Boquilla fija tipo pulverizadora para filtro percolador.*

El distribuidor rotativo ha sido el elemento estándar en estos filtros debido a su facilidad de mantenimiento, bajo costo de propulsión, y su confiabilidad. Este sistema consiste de dos o más tuberías montadas sobre una columna central hueca que sirve como pivote en el centro del filtro y gira en un plano horizontal a pocos centímetros sobre el medio filtrante (figura 22).

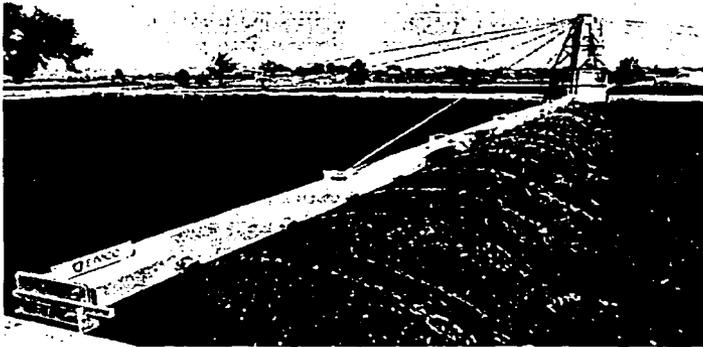


Figura 22 *Brazo distribuidor de un filtro percolador.*

El distribuidor puede ser impulsado por un motor eléctrico, usado generalmente para filtros pequeños, o bien por la reacción dinámica del agua residual a tratar, que es el caso más común. En el primer caso la velocidad de rotación es constante, mientras en el segundo caso dicha velocidad depende del gasto con que esté trabajando la unidad, pero en ambos casos la velocidad de giro deberá ser del orden de una vuelta completa cada 10 minutos, o menos para distribuidores de varios brazos. Permitiendo un reposo mínimo entre alimentaciones de alrededor de 30 segundos. La pérdida de carga a través del distribuidor es del orden de 0.6 a 1.5 m, mientras que la carga necesaria para su funcionamiento es de alrededor de 3 m.

La velocidad del brazo distribuidor obedece a la fuerza de reacción equivalente a la velocidad de salida del agua por las boquillas aspersoras. Esta velocidad está definida por la ecuación:

$$(25) \quad v = c * (2gh)^{1/2}$$

donde v = velocidad del brazo distribuidor giratorio (m/s).

c = coeficiente de velocidad = 0.97.

g = constante de aceleración por gravedad (9.81 m/s^2).

h = carga hidráulica efectiva (m).

Los brazos al girar deben mantenerse a una distancia de 15 a 22 cm de la parte superior del medio filtrante para permitir que el agua residual salga por las boquillas de modo uniforme, distribuyéndose en todo el medio, evitando así en la regiones frías que las posibles acumulaciones de hielo puedan impedir el movimiento de los brazos durante épocas de heladas.

Aún con lo anterior, la distribución no es completamente uniforme sobre el medio y siempre quedan fracciones de la superficie del filtro que reciben poco flujo de agua residual.

En la figura 23 se muestra un detalle típico del montaje del brazo distribuidor de un filtro percolador.

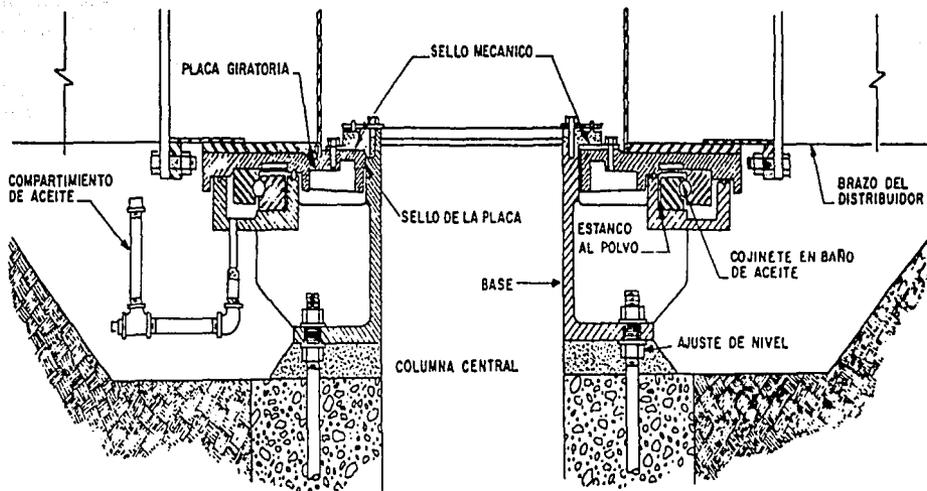


Figura 23 Detalle del montaje del brazo distribuidor en la columna central de un filtro percolador.

Los brazos del distribuidor están provistos de boquillas para proporcionar un chorro redondo o plano. El chorro redondo se obtiene mediante una boquilla de orificio, mientras que el chorro plano se produce haciendo que el chorro redondo pegue con una lámina situada bajo la boquilla (figura 24).

Otro tipo muy común consiste en el esparcimiento del agua en forma de rocío lo que se logra con una boquilla cónica provista de un plato quebrachorros, o bien con un aboquilla cónica que posea un balín de acero en su interior.

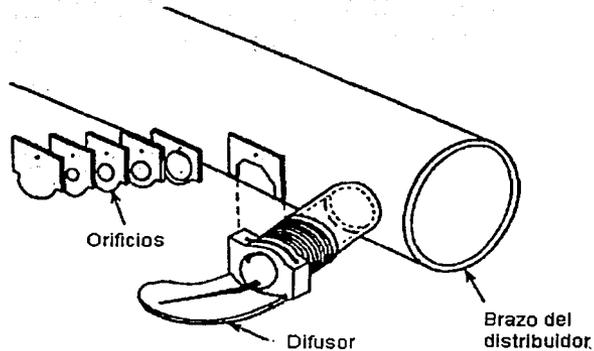


Figura 24 Detalle la boquilla en un brazo distribuidor de un filtro percolador.

Los brazos del distribuidor en unidades pequeñas son de sección transversal constante, mientras que, para unidades grandes son de sección decreciente con el prospecto de tener un gasto de salida constante en todas las boquillas. A lo largo de los brazos del distribuidor, algunas ocasiones se colocan las boquillas irregularmente de tal manera que se consigue un gasto mayor por unidad de longitud en la periferia, lo que involucra un mayor número de orificios en el contorno.

Otras características que debe tener el brazo distribuidor son, la resistencia de su construcción, facilidad de limpieza, resistencia a la corrosión del material y su capacidad para recibir fluctuaciones grandes en el gasto, sin variar considerablemente su velocidad de giro.

Actualmente existen distribuidores hasta de 60 m de diámetro, los cuales por lo general, su colocación la hacen los fabricantes de esta pieza, utilizando tirantes que van desde los brazos hasta la columna central, los cuales tensan para que los brazos se encuentren en un plano horizontal y durante su operación no presenten vibración o desnivelación alguna (figura 25).

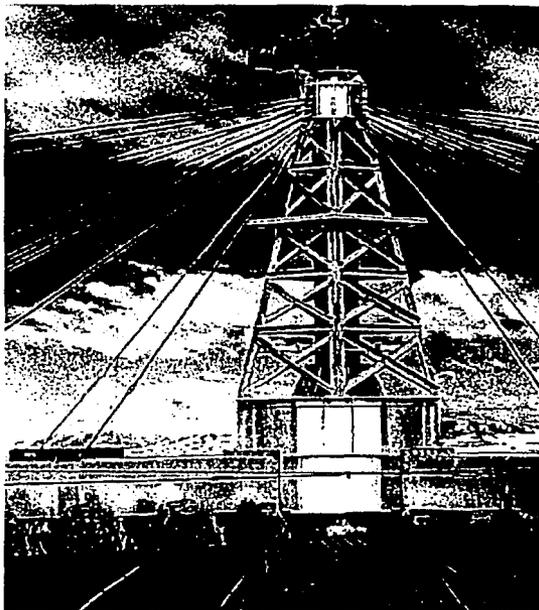


Figura 25 Columna central de un filtro percolador de gran diámetro.

III.1.2 Medio filtrante.

El medio filtrante es la parte esencial del filtro percolador, ya que solamente provee el área superficial para que las bacterias se desarrollen y realicen su función de biodegradación, además de que le medio debe provocar una distribución de nutrientes y aire mientras se desalojan los productos finales.

El medio usado en los filtros percoladores es usualmente grava o roca triturada con un tamaño en el rango de 2 ½ a 3 ½ pulgadas (figura 26). El tipo de roca empleado debe ser de

naturaleza dura, ya que las rocas suaves tienden a fragmentarse con el tiempo y ocasionan problemas en el flujo del agua residual a través del filtro.



Figura 26 *Medio filtrante de roca.*

Una gran variedad de medios plásticos han sido desarrollados, con variadas formas y orientaciones de manera que evitan la formación una película biológica delgada (figura 27). El medio sintético es usado cuando no se encuentra disponible en la zona un medio natural. Los requisitos esenciales para un medio filtrante es que este sea de material inerte, resistente y tenga una superficie de contacto alta en relación con el volumen ocupado, añadiendo a esto que los espacios entre los elementos del medio, sean lo suficientemente grandes para evitar un taponamiento y una adecuada ventilación, lo que lleva a que los medios sintéticos sean mucho más ligeros que los naturales.

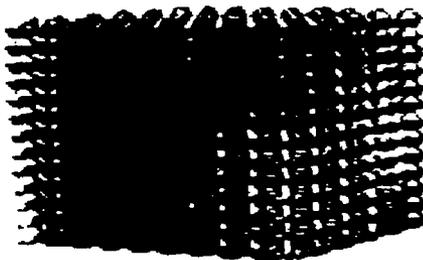


Figura 27 *Medio filtrante sintético.*

Los filtros percoladores que usan medios de roca, suelen ser de hasta 2.5 m de profundidad, mientras que con la utilización de medios sintéticos, se han construido filtros de hasta 12 m de profundidad.

III.1.3 Sistema de bajo dren.

El sistema de bajo dren, recibe el agua residual tratada y los sólidos descargados del medio filtrante y los lleva a un conducto que se prolonga hasta el tanque de sedimentación secundario o clarificador.

Los pisos de los filtros se construyen generalmente de concreto con refuerzo de malla de acero. Tienen una pendiente de 0.5 a 5%. Existen canales principales de drenaje diagonales o periféricos que reciben el flujo proveniente del medio filtrante.

Algunos filtros percoladores de carga alta y muy alta, se han construido sin paredes, sin embargo, la mayoría de los filtros tienen paredes de concreto reforzado en toda su periferia, usualmente con espesores de 20 y 30 cm. Los diferentes tipos de materiales que son utilizados para las paredes de los filtros, pueden influir en la capacidad de inundación o en el tratamiento en sí, debido a su influencia en la ventilación y en la temperatura. Durante épocas frías, se ha descubierto la ventaja de que las paredes del filtro o algún tipo de barrera se sobreeleve en relación con el medio filtrante, para evitar que las corrientes de aire frío choquen directamente con el medio provocando congelamiento en la superficie del mismo medio. A raíz de que la mayoría de los medios sintéticos son autosoportables, la función de las paredes de concreto se ha limitado a contener el flujo del agua residual y mantener su temperatura. Debido a lo anterior, se han fabricado paredes de fibra de vidrio en forma modular, que son soportadas por marcos de aluminio o de acero. En filtros percoladores muy profundos, generalmente se requieren soportes estructurales intermedios.

En filtros percoladores cuyo medio filtrante es de roca o similar, el medio se encuentra soportado por bloques de drenaje, precolados, perforados, de barro vidriado o de concreto, que se encuentran soportados sobre el piso de la estructura del filtro (figura 28). Los bloques se

encuentran dispuestos, en ángulos rectos respecto a los drenes principales. Sus perforaciones están orientadas hacia arriba y ocupan 20% o más de la cara superior. Además de la función de los bloques como drenes de las aguas residuales tratadas, soportan al medio filtrante y permiten el paso del aire necesario para la ventilación del filtro percolador, ya que al operar el filtro percolador, la cantidad de agua residual drenada no rebasa el 50% del área transversal de los canales de los bloques, permitiendo así en todo momento la libre circulación del aire a través del medio filtrante desde el fondo del filtro que se encuentra abierto al aire libre por medio de unas ventanas con tapa y/o por medio de respiraderos que van desde la parte superior del medio hasta el fondo del filtro.

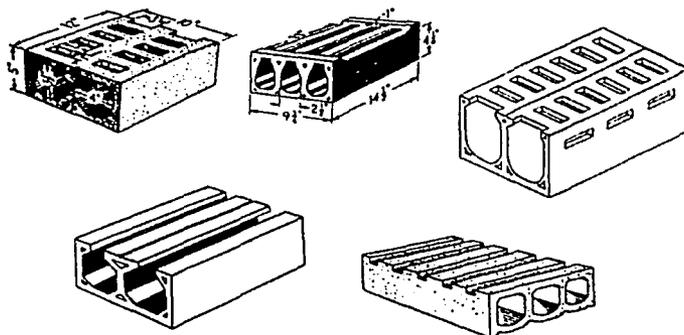


Figura 28 Tipos de bloques de drenaje de concreto precolado.

Cuando el medio filtrante es sintético, los bloques de drenaje no son adecuados, ya que el medio sintético se puede soportar por medio de otros sistemas simulando un entarimado, el cual resulta más económico y ligero. Para conducir el efluente del filtro percolador al sedimentador secundario o al tanque clarificador, se utiliza un canal de recolección de sección rectangular o circular, con una pendiente tal que el agua transite a una velocidad de entre 0.6 y 0.9 m/s, para evitar que los sólidos sedimenten provocando una obstrucción en el canal.

En ocasiones, cuando se requiere dar mantenimiento al medio filtrante, se provoca su inundación por 24 horas, esto se hace cerrando la salida del canal de recolección y cada una de

las ventanas en la parte baja del filtro.

III.1.4 Ventilación.

La circulación de aire en un filtro percolador se debe al movimiento convectivo del aire a través del medio debido a la diferencia de temperaturas y densidades entre el aire en el filtro inducida por la temperatura del agua residual, y el aire del ambiente.

La ventilación en el filtro percolador es importante en el mantenimiento de las condiciones aeróbicas dentro del mismo que asegurarán un tratamiento efectivo. Por lo que respecta al sistema de ventilación, como existen diferentes temperaturas en el interior del filtro, se mantiene un intercambio de calor en el medio filtrante, este cambio de temperatura del aire dentro del filtro provoca de modo natural los cambios de dirección de las corrientes de aire. El flujo del aire a través de un filtro es descendente si la temperatura del aire es mayor que la del agua residual y viceversa. Durante el invierno, cuando las temperaturas del ambiente son bajas el flujo del aire será ascendente. Sin embargo, si la temperatura del aire está por debajo de la temperatura de congelamiento, un flujo de aire a través del medio, congelara la capa de agua residual fija en el mismo, lo que provocara una condición indeseable en la operación del filtro percolador.

Los drenes inferiores ventilan el filtro proporcionando aire a los microorganismos que viven en las capas inferiores del medio filtrante. La ventilación natural es muy conveniente y eficaz si se cumplen los siguientes requisitos:

- a) Que los drenes inferiores y canales recolectores estén diseñados para que, en flujo máximo, estén llenos hasta la mitad de su altura.
- b) Que en ambos extremos del canal de recolección se instalen respiraderos de ventilación o chimeneas.
- c) Que los filtros de gran diámetro tengan canales recolectores secundarios con ventanas o respiraderos cercanos a la periferia.

- d) Que el área de los orificios en la parte superior de los bloques de drenaje no sea menor del 15% del área total del filtro.
- e) Que por cada 25 m² de área de filtro se proporcione un área total de 0.10 m² de rejilla abierta en los respiraderos.

Cuando los filtros van a trabajar sumamente cargados, en climas extremos, extremadamente profundos o en el caso de filtro percoladores cubiertos (figura 29), es adecuado proyectar un sistema de ventilación forzado proporcionando un flujo de aire de 0.3 m³/min * m² de superficie de filtro en cualquier dirección. El aire se puede suministrar por medio de sopladores y un sistema difusor cercano a los drenes.



Figura 29 *Imagen de un filtro percolador cubierto con domo y sistema de ventilación.*

En este caso no es conveniente que se inunde el medio filtrante para darle mantenimiento ya que puede averiarse el sistema de inyección de aire, y siempre debe de hacerse funcionar el sistema de aireación conjuntamente con la inclusión de agua residual. La práctica de utilizar ventilación forzada, salvo casos excepcionales, ha entrado en desuso. La fuerza del flujo actuante del aire en circulación dentro del filtro percolador, que es la altura de presión resultante de la diferencia de temperaturas, puede determinarse a partir de la siguiente ecuación:

(26)

$$F_{\text{aire}} = 0.353 (1/T_c - 1/T_n) Z$$

donde F_{aire} = fuerza de flujo de aire actuante (cm agua).

T_c = temperatura fría (K).

T_n = temperatura caliente (K).

Z = altura del medio filtrante (cm).

Para obtener una temperatura más conservadora del aire en el filtro percolador, puede usarse la siguiente ecuación:

(27)

$$T_m = (T_2 - T_1) / (\ln (T_2/T_1))$$

donde T_1 = temperatura más caliente (K).

T_2 = temperatura más fría (K).

Las partes que constituyen un filtro percolador se observan claramente en la siguiente figura.

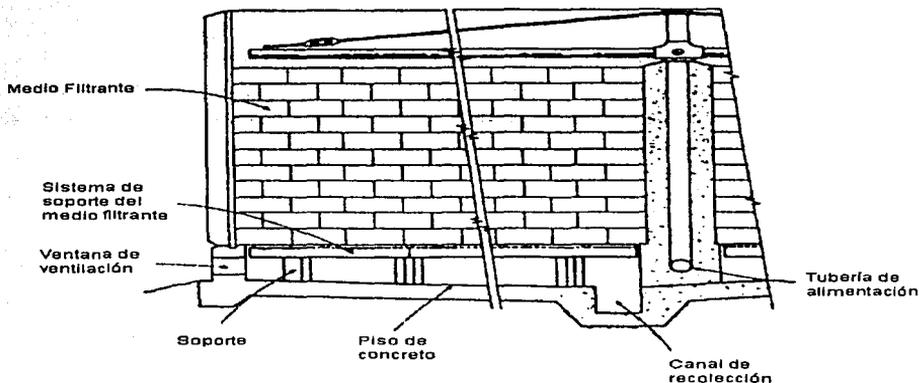


Figura 30 Sección transversal del filtro percolador típico.

III.2 Medio filtrante.

El propósito de los medios filtrantes o medios de empaque es el de proporcionar un soporte sólidos y estable para la película biológica, y para exponer la máxima área superficial al flujo del agua residual en tratamiento, y de la superficie mojada al contacto del aire. El material del medio debe ser inerte a las sustancias en contacto con él, de manera que no inhiba el crecimiento de la capa de lama microbiana ni que sea atacada por sustancias presentes en las aguas residuales bajo tratamiento. Debe ser lo suficientemente resistente para soportar su propio peso y el de la película biológica y que no se desintegre durante un cierto periodo de tiempo.

La configuración del medio debe permitir suficientes espacios entre las superficies adyacentes para que pueda crecer la película biológica sin los tales espacios sean bloqueados, y permitir así el flujo del agua residual y del aire a través del filtro percolador. Los tipos de medios se pueden clasificar en dos grupos: los medios minerales o convencionales, y los medios especialmente fabricados, de reciente desarrollo, construidos generalmente con materiales plásticos. Es importante mencionar que el tipo de medio influye fuertemente tanto en los costos y características de funcionamiento del biofiltro.

Las dos propiedades más importantes de los medios filtrantes son la superficie específica y la fracción de vacíos. La superficie específica se define como los metros cuadrados de superficie de relleno por metro cúbico de volumen total. Cuanto mayor sea la superficie específica mayor será la cantidad de biomasa por unidad de volumen. Por otra parte, a mayor fracción de vacíos, se consiguen cargas hidráulicas superiores sin peligros de inundación.

III.2.1 Características de los medios filtrantes.

Debido a la importancia del medio filtrante en la biodegradación de la materia orgánica en el filtro percolador, a continuación se enuncian algunas de las características que se deben considerar al momento de seleccionar un medio filtrante.

- a) Superficie específica alta. Que indicará el área disponible para el crecimiento bacterial

dado un volumen determinado del medio. Naturalmente, tienden a seleccionarse los medios con valores altos, que darán indicios sobre la capacidad del filtro percolador para la biodegradación de la materia orgánica.

- b) Fracción de vacíos. Que indica el porcentaje de espacio libre por unidad de volumen del medio. Un valor alto indicará mayor libertad de flujo de agua residual y aire dentro del medio.
- c) Paso libre. Indica el tamaño mayor de un sólido que pasará a través del medio sin restricción por obstáculo del mismo medio.
- d) Resistencia al taponamiento u obstrucción. Unos de los mayores problemas de operación en un filtro, es el constante taponamiento del medio, lo que provoca plazos de mantenimiento cortos, disminuyendo la operatividad de la planta tratadora. En ocasiones se seleccionan medios filtrantes, los cuales se puedan remover en secciones o partes, facilitando así las labores de mantenimiento.
- e) Material inerte del medio filtrante. Se busca que los materiales que constituyen los medios sean capaces de resistir los ataques físicos, químicos y biológicos, a que se ven expuestos durante su transporte, manejo, colocación, operación y mantenimiento.
- f) Bajo costo por unidad de volumen. El tipo de medio que se seleccione, influirá considerablemente en los costos de construcción, operación y mantenimiento del filtro percolador.
- g) Ligereza. Se debe considerar el tipo de medio de un filtro percolador para el diseño de la cimentación del filtro y de las estructuras anexas como columnas, pisos y el propio muro de retención, ya que existen medios sumamente pesados y otros muy ligeros.
- h) Flexibilidad de forma. Se intenta que el tipo de medio filtrante, se adapte perfectamente a la forma, dimensiones y profundidad del filtro percolador, evitando así áreas o zonas muertas dentro del volumen del filtro.

- i) **Facilidad de mantenimiento.** Se procurará que el medio elegido sea fácil de mantener en buenas condiciones de operación, ya que un problema provocado por el medio, puede resultar en una solución bastante cara debido a la pérdida de capacidad de tratamiento de la planta o a la demora en la reparación o sustitución del medio filtrante.
- j) **Bajo consumo de energía.** Debido a la diversidad de dimensiones de los filtros percoladores condicionadas por los diferentes tipos de medios filtrantes, el consumo de energía vinculado a un tipo específico de medio, debe considerarse en los costos y planes de operación del sistema de tratamiento.

III.2.2 Medios convencionales.

Los medios minerales se han utilizado durante mucho tiempo ya que se encuentran en la naturaleza. Comúnmente se usan piedras cuidadosamente graduadas, y el coque metalúrgico, las escorias de altos hornos se han utilizado con éxito. También se han utilizado medios de cerámica especialmente fabricados, entre los que se encuentran los anillos de Raschig, Lessing y las silletas de Berl. También se ha tenido éxito con la utilización de materiales más baratos, como los escombros o tabiques rotos, sin embargo, estos tienden a desmoronarse después de cierto tiempo de manera que el filtro se bloquea con el medio desintegrado.

El tamaño normal de las piedras utilizadas en los medios filtrantes es de 50 a 100 mm, lo que proporciona una superficie específica mínima de $110 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ y una fracción de espacios vacíos de 40 a 55%. Las piedras graduadas se colocan de manera que las mayores queden en la parte baja del filtro percolador y las menores en la parte superior, formando un medio filtrante con una altura de entre 2 y 3 m. En este tipo de medios, tiene lugar una significativa canalización del flujo de agua residual, cuando más de aproximadamente el 50% del espacio vacío está ocupado por la lama microbiana.

Por lo general, un medio mineral es pesado, de manera que exigen cimentaciones fuertes, teniendo, por lo tanto, altos costos de construcción. Los empaques de piedras pesan entre 1350 y $1550 \text{ kg} / \text{m}^3$, la escoria de altos hornos pesa alrededor de $1145 \text{ kg} / \text{m}^3$ y los anillos de Raschig

510 kg / m³. Los medios profundos de medio rocoso pueden presentar problemas de ventilación.

La principal desventaja de los medios minerales es su peso, que limita de un modo efectivo la profundidad de los filtro percoladores, y su limitado espacio vacío, donde la mitad del volumen del medio está ocupado por el propio medio de empaque.

Los medios minerales han demostrado ser efectivos en procesos donde al filtro percolador se le induce una carga hidráulica y de nutrientes baja (figura 31).



Figura 31 Imagen de medio filtrante mineral convencional (roca).

Tabla 20 Granulometría aconsejable de material filtrante para filtros percoladores.

<i>Tamaño de material</i>	<i>%</i>
Retenido en un tamiz de 4 ½"	100
Retenido en un tamiz de 3"	95 – 100 (en peso)
Pasando un tamiz de 2"	0 – 2 (en peso)
Pasando un tamiz de 1"	menos de 1%

FUENTE: SEDUE, 1998.

III.2.3 Medios sintéticos.

Los medios sintéticos de fabricación especial (figura 32), han sido desarrollados como solución a las desventajas de los medios minerales, entre las que se encuentran el ofrecer una mayor superficie de soporte, menor peso, mayores profundidades de los percoladores, mayor fracción de vacíos, capacidad de manejo de altas cargas hidráulicas, menor riesgo de quedar obstruidos y requerimientos estructurales de soporte y contención simples.

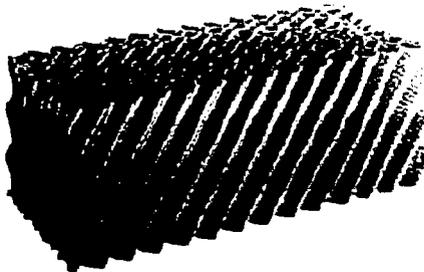


Figura 32 Imagen de medio filtrante sintético (común).

Por lo general los medios sintéticos son de material plástico, con varias configuraciones alternativas. Este tipo de medios, tienen altas fracciones de espacio en general, mayores al 90%, con amplios espacios internos y pesan aproximadamente la décima parte de lo que pesan los medios minerales en operación. Esta ligereza en el peso permite utilizar filtros más profundos, donde las capas inferiores del empaque son capaces de resistir una profundidad del medio de 12 m junto con la película biológica asociada, haciendo notar que este peso, es varias veces el peso del medio seco. La alta fracción de espacios vacíos y los amplios espacios internos, permiten aplicar al filtro grandes flujos de agua residual que a la vez contenga una alta carga de nutrientes orgánicos, sin riesgo de obstruir el lecho, debido al excesivo crecimiento de la biomasa.

Aunado a lo anterior, existen diseños de medios sintéticos que provocan el desprendimiento de la biomasa. Algunas configuraciones de medios sintéticos, son adecuadas

para operar en filtros percoladores que reciban una alta tasa de flujo y carga de nutrientes por parte del agua residual.

Los valores específicos de superficie de los medio sintéticos, varían notablemente según la configuración que se usa, pero sus valores varían dentro de un rango que va desde un valor aproximado al de los medios minerales, hasta más del doble de dichos valores. La configuración de los empaques debe promover la distribución uniforme del agua residual, haciendo mínima la canalización, y presentar una superficie específica de alta capacidad de humectación y el conjunto de la unidad debe presentar un costo global atractivo, en términos de la eliminación de nutrientes.

III.2.3.1 Configuración de los medios sintéticos.

El diseño de los medios sintéticos de soporte que se pueden obtener comercialmente, se pueden clasificar convenientemente en dos grupos: medios ordenados y medios al azar. Los medios ordenados se forman por la distribución de superficies sólidas de soporte, cuidadosamente orientados, a fin de proporcionar una óptima distribución del agua residual que fluye sobre las superficies. Están contruidos en la mayoría de los casos, con materiales plásticos, y se ensamblan como módulos de tamaño conveniente, que se apilan cuidadosamente para formar la cama del percolador. Los medios ordenados se pueden clasificar según su configuración, como medios de láminas verticales, medios de tubos verticales y medios de redes geométricas.

Los medios de láminas verticales consisten en láminas de plástico corrugado y acanalado, por lo general de cloruro de polivinilo (PVC) (figura 33), ensambladas para formar un bloque o modulo que contiene numerosos canales abiertos, en zigzag. El medio puede ser transportado como láminas, para ser conformados como módulos en el lugar, o como módulos preparados de antemano.

Dichos módulos se apilan para formar el medio del tamaño deseado, con los módulos dispuestos con sus láminas componentes en posición vertical, y con la dirección lateral de las láminas en ángulo recto con los de la capa inferior. El espaciamiento de las láminas puede variar entre 40 y 60 mm. El medio así formado tiene un espacio vacio de 95% y una superficie específica

entre 85 y 239 m^2 / m^3 de medio, dependiendo del tipo de láminas y de su espaciamento.

La profundidad de los filtro así formados puede ser de 3 m sin apoyo intermedio, con un máximo de 7.5 m. Este tipo de medio se adapta particularmente bien a las operaciones de altas tasas de carga. El peso del medio seco es de aproximadamente 40 kg / m^3 , aumentando hasta tanto como 300 kg / m^3 , en operación.

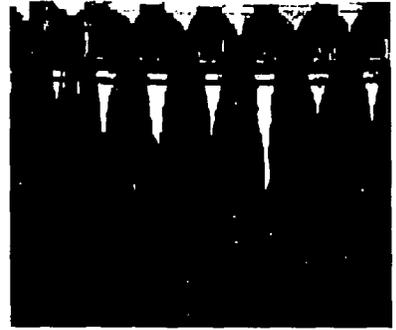
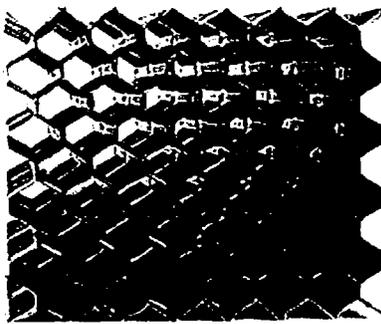


Figura 33 *Imagen de medio filtrante sintético laminado rígido y flexible.*

Los medios de tubos verticales, consisten de un ensamblaje estrechamente empaçado de tubos verticales, con un diámetro de 80 mm, fabricados de PVC no plastificado y que se extienden a toda la profundidad del filtro. Cada tubo se divide interiormente para formar una estructura en forma de panal con tubos más pequeños teniendo cada uno de ellos alrededor de 15 mm por lado. Esto proporciona un espacio de vacíos de 94% y una superficie específica de 220 m^2 / m^3 de medio. El medio utiliza una profundidad entre 4 y 6 m.

La eficiencia de un medio tubular depende en gran manera de la uniformidad de la distribución del agua residual en la parte superior del filtro, ya que una vez que el agua residual entra en el tubo, se quedará ahí hasta llegar al fondo del medio, y un tubo que no reciba suministro se quedará seco en toda su longitud.

Los medios de redes geométricas se fabrican con cilindros verticales formados por redes plásticas, ensambladas para formar módulos con estructura de malla geométrica, la que proporciona fácil acceso del aire y facilita el desprendimiento de la película biológica. Un medio ordenado, consiste de láminas corrugadas de metal desplegado (figura 34), ensambladas a fin de formar una estructura de panal.

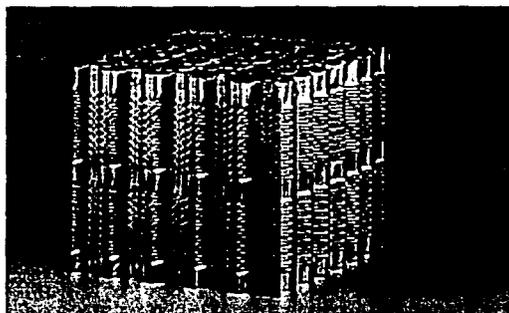


Figura 34 Imagen de medio filtrante sintético de lámina corrugada.

Los medios de empaque al azar consisten de piezas plásticas de forma especial, apiladas sin una especial orientación, dentro de una apropiada estructura de retención, las piezas plásticas son anillos o tubos cortos de PVC o polipropileno (figura 35), su área superficial se aumenta de diversas maneras, con perforaciones en las paredes y la inclusión de ondulaciones internas o externas o aletas, con dimensiones típicas de 5 a 90 mm.

El espacio de vacíos en los medios empacados con dichas piezas es aproximadamente al mismo que el de los empaques ordenados, y a pesar de que los valores de la superficie específica son también similares, se pretende obtener valores hasta de $330 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ para uno de los tipos.

El medio de empaque se arma de una manera relativamente simple volcando la masa de piezas plásticas dentro de la estructura del recinto. El peso seco de un medio al azar es de 40 a 70 kg / m^3 , y hasta 200 kg / m^3 en operación.

Algunas de las características más importantes de medios filtrantes comunes se presentan en la tabla 21.



Figura 35 Imagen de medio filtrante sintético (anillo especial).

Tabla 21 Características de varios tipos de medios filtrantes.

Medio	Tamaño		Peso		Superficie específica		Fracción de vacíos %
	cm	plg	kg/m ³	lb/ft ³	m ² /m ³	ft ² /ft ³	
Roca	2.5-6.5	1-2.5	1250-1442	78-90	56-69	17-21	40-50
	10-12.5	4-5	800-993	50-62	39-164	12-50	50-60
Escoria	5-7.5	2-3	897-1200	56-75	56-69	17-21	40-50
	7.5-12.5	3-5	800-993	50-62	46-59	14-18	50-60
Madera roja	122x122x51	48x48x20	32-96	2-6	39-49	12-15	70-80
Flujo cruzado	61x61x122	24x24x48	24-63	1.5-3.9	98-226	30-69	95->95
Medio al azar	1.5-8.9	0.6-3.5	53-112	3.3-7	102-330	31-101	88-95

FUENTE: RONALD L. DROSTE, 1999.

III.2.3.2 Funcionamiento de los medios plásticos.

Estudios comparativos sobre el funcionamiento de los medios sintéticos, indican que la eficiencia de la separación de nutrientes para condiciones de carga dadas está determinada principalmente por la superficie específica del medio filtrante. Al considerar los valores citados para la superficie específica, se debe tener en cuenta que ciertas partes dentro del medio puede que nunca se mojen, o en todo caso, que se mojen de manera intermitente por el flujo de agua residual, y que por lo tanto no soporten el crecimiento de la biomasa. También es importante considerar que el funcionamiento del filtro percolador sea afectada por la distribución del agua residual en él mismo.

Se ha establecido el funcionamiento más eficiente de los medios plásticos al azar, debido al patrón de flujo de la película de agua residual dentro del medio (figura 36). En los medios al azar, la capa líquida está sometida a frecuentes y sucesivos cambios de dirección por causa de los perfiles plásticos, lo que resulta en una mejor humectación de las superficies del medio, mejor mezcla del líquido y transferencia mejorada del oxígeno comparados con los empaques ordenados, a pesar de que los desprendimientos de la película de lama podrá efectuarse con menor facilidad.

La película de lama microbiana desarrollada sobre los medios plásticos es, ecológicamente, similar a la que se forma sobre los medios minerales. Como los percoladores con empaques plásticos operan por lo general a altas concentraciones de cargas hidráulicas, la remoción de exceso de película de lama es el resultado de la acción de lavado por el flujo de líquido más bien que de la actividad de los organismos macroinvertebrados.

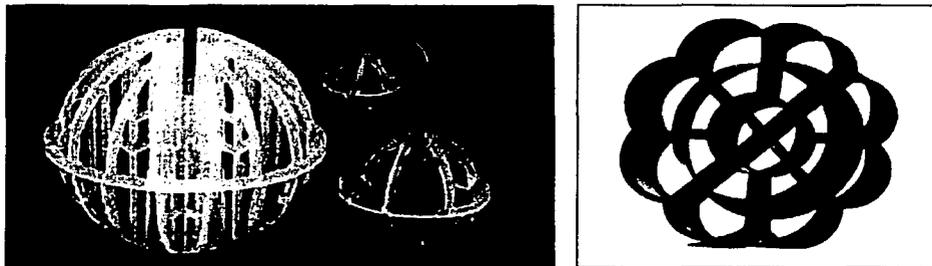


Figura 36 Imagen de medios filtrantes sintéticos de colocación al azar.

Esto conduce a una distribución más uniforme de la película microbiana en todo el medio, con un espesor de aproximadamente 1 mm, y con una pérdida más regular de lama durante el año, y sin una marcada descarga de sólidos en la primavera, lo que acompaña el aumento de la población macroinvertebrada.

III.3 Clasificación de los filtros percoladores.

Los filtros percoladores se clasifican según su carga o tasa hidráulica u orgánica, en filtros de carga baja, de carga intermedia, de carga alta o carga muy alta. Cada una de estas clasificaciones tiene otras características operacionales, que también los diferencian, como por ejemplo, la proporción de recirculación del efluente.

Se entiende por carga hidráulica, carga superficial o carga líquida sobre un filtro percolador la cantidad de agua residual que recibe un filtro percolador en términos de miles de metros cúbicos aplicados por día y por metro cuadrado de superficie del medio filtrante.

Recibe el nombre de carga orgánica o carga másica de un filtro percolador, la cantidad de DBO_5 que recibe el filtro, medida en kg por día por m^3 del medio filtrante, sin incluir la DBO del caudal recirculado.

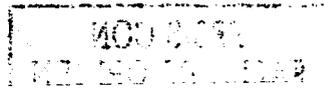
Es de hacer notar que los rangos para definir el tipo de filtro percolador según su velocidad de percolación tanto hidráulica como orgánica, son un tanto arbitrarios. Lo importante es que normalmente existe una correspondencia entre la carga hidráulica y la carga orgánica, aunque la posibilidad de una alteración en estos parámetros no se descarta, con la consecuente baja de eficiencia del filtro percolador.

En términos generales, los procesos a baja tasa separan un alto porcentaje de los nutrientes del afluente, pero la tasa de remoción es baja, en términos de la masa de nutrientes removidos por volumen unitario del sistema. Por el contrario, los tratamientos alta tasa eliminan una más baja proporción de los nutrientes de afluente, pero a una alta tasa en términos de la masa por volumen unitario. Por lo tanto, a los procesos a alta tasa se les llama en ocasiones tratamiento burdo y a los procesos a baja tasa, tratamiento de pulimento.

III.3.1 Filtro de carga baja.

Las aguas residuales de baja concentración, como las aguas negras estancadas o el efluente de etapas previas de tratamiento, se llevan a un nivel de contaminación aceptable para su descarga en un cuerpo de agua o reuso, por medio de un tratamiento a baja tasa. Los medios minerales convencionales se usan comúnmente para el tratamiento a baja tasa, aunque los medios sintéticos aleatorios se utilizan cada vez más. Por lo general, los filtros percoladores a baja tasa se utilizan como etapa final de pulimento, después de una etapa a alta tasa.

Un filtro de carga baja es un dispositivo relativamente sencillo y de funcionamiento sumamente seguro (figura 37), que produce una calidad de efluente estable, sin perjuicio de que el afluente sea de naturaleza cambiante.



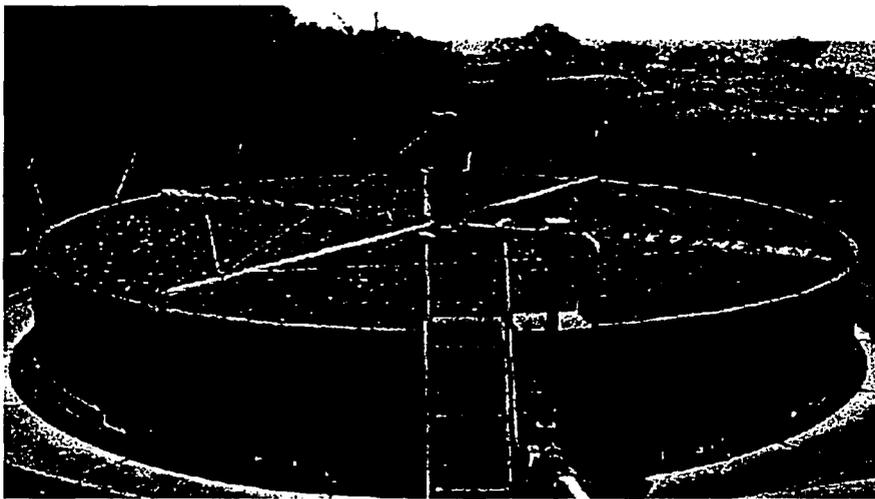


Figura 37 *Imagen de filtro percolador de baja carga.*

Generalmente, se mantiene una carga hidráulica constante, no por recirculación, sino por unas bombas con control de nivel de succión o sifones dosificadores. Los tanques dosificadores son de tamaño pequeño, generalmente con un tiempo de detención de únicamente 2 minutos para un caudal igual al doble del medio de proyecto, de tal modo que se minimice la dosificación intermitente. Si el intervalo entre dosis es mayor de 1 o 2 horas, la eficacia del proceso se deteriora porque el carácter de la película biológica se altera por falta de humedad.

En la mayoría de los filtros de baja carga, solamente existe una película biológica apreciable en una profundidad de 0,6 a 1,2 m de la parte superior del medio filtrante. Como consecuencia, en las partes inferiores del filtro pueden desarrollarse bacterias autótrofas nitrificantes que oxidan el amoníaco a las formas de nitrato y nitrito. Si la población de nitrificantes está suficientemente bien establecida, y si las condiciones climáticas y las características del agua residual son favorables, un filtro de baja carga funcionando correctamente puede proporcionar no

sólo una buena eliminación de DBO, sino también un efluente altamente nitrificado.

La carga orgánica medida en DBO₅ de estos filtros se encuentra en el rango de 0.08 a 0.32 kg / m³-día, y una carga hidráulica de 1 a 4 m³ / m²-día, en medios con profundidades de 1.5 a 3 m. La remoción de DBO₅ es del orden del 90 a 95%.

La pérdida de carga a través del filtro puede ser de 1.5 a 3 m, lo que puede ser un impedimento si el terreno es demasiado plano para permitir la circulación por gravedad. Los filtros de este tipo tienen algunos inconvenientes. Los malos olores son frecuentes, especialmente si el agua residual es poco reciente o si el clima es cálido, las moscas del tipo *Psychoda* se desarrollarán en los filtros, a menos que se tomen medidas para su control.

III.3.2 Filtro de carga intermedia.

Debido a las modificaciones en la carga hidráulica y de nutrientes en los percoladores mediante diversas técnicas, se han logrado filtros percoladores con características diversas, lo que ha llevado a clasificarlos dentro de diversos rangos. Uno de los cuales son los filtros del tipo de carga intermedia (figura 38).

Este tipo de filtro no es muy común, y pueden emplear o no recirculación, la que debe ser utilizada durante momentos de bajo flujo de afluente con el objeto de mantener en movimiento al sistema distribuidor.

Los filtros percoladores de carga intermedia, pueden estar configurados en una sola etapa o dos etapas, es decir, en serie, lo que resultará en la remoción del 85 al 90% de la DBO₅. La carga orgánica de los filtros percoladores de carga intermedia se establece entre 0.24 y 0.48 kg / m³-día, y una carga hidráulica de 4 a 10 m³ / m²-día.

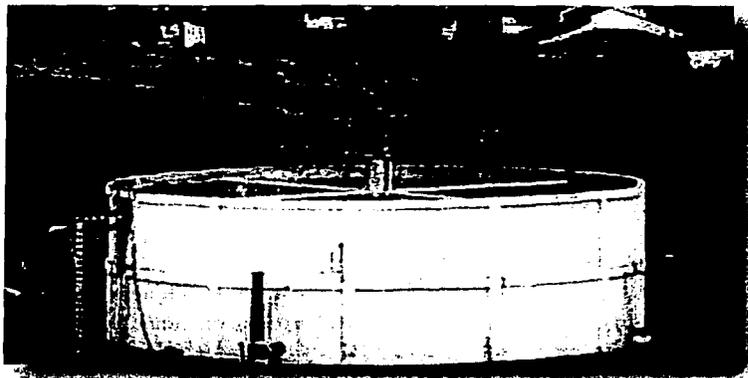


Figura 38 Imagen de un filtro percolador de carga intermedia.

III.3.3 Filtro de carga alta.

Este tipo de filtros, siempre tienen recirculación de su efluente, pueden ser configurados en una o dos etapas (figura 39), las cuales en promedio removerán del 75 al 80% de DBO_5 , y del 85 al 90% de DBO_5 correspondientemente.

Estos tipos de filtros percoladores, no pueden producir un efluente altamente nitrificado. Sin embargo permite la aplicación de mayores cargas orgánicas, al tiempo que se reducen los problemas de obstrucción de medio, malos olores y moscas.

La carga orgánica de los filtros percoladores de carga alta se encuentra en el rango de 0.32 y 1.0 $\text{kg} / \text{m}^3\text{-día}$, y con una carga hidráulica de 10 a 40 $\text{m}^3 / \text{m}^2\text{-día}$.

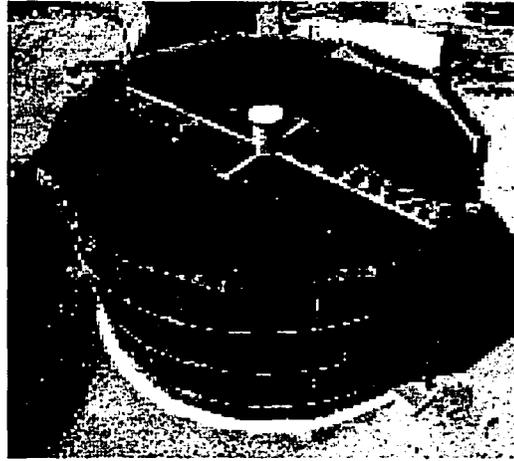


Figura 39 Imagen de un filtro percolador de alta carga.

III.3.4 Filtro de carga muy alta.

Al igual que en los filtros de carga alta, este tipo de filtros siempre cuenta con recirculación del efluente, y medio sintético, lo que les da una gran altura, desde 4.5 hasta 12 m (figura 40), y son frecuentemente usados como proceso inicial de tratamiento secundario, debido a su carácter de degradación burda, seguidos por filtros percoladores de carga baja o intermedia, o por otro tipo de proceso como el de lodos activados. Esta última combinación ha dado excelentes resultados en la remoción de DBO_5 de valores altos, por lo que esta combinación de procesos es frecuentemente usada en el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales.

La carga orgánica que soportan los filtros percoladores de carga muy alta están en el rango de 0.80 y 6.0 $\text{kg} / \text{m}^3\text{-día}$, y con una carga hidráulica de 40 a 200 $\text{m}^3 / \text{m}^2\text{-día}$. Con cargas extremadamente bajas, este tipo de filtro percoladores se utiliza para realizar la nitrificación de efluentes tratados.

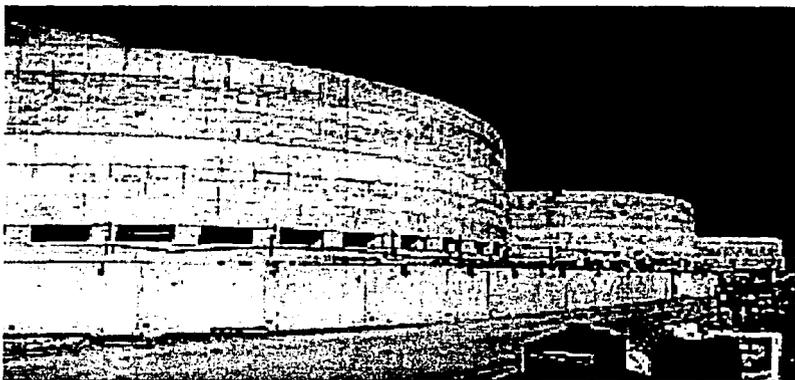


Figura 40 Imagen de filtros percoladores de carga muy alta.

Tabla 22 Información de características típicas de filtros percoladores.

Concepto	Filtro de Carga baja	Filtro de carga Intermedia	Filtro de Carga alta	Filtro de carga Muy alta
Carga hidráulica $m^3 / m^2 \cdot día$	1-4	4-10	10-40	40-200
Carga orgánica $kg / m^3 \cdot día$	0.08-0.32	0.24-0.48	0.32-1.0	0.80-6.0
Profundidad m	1.5-3.0	1.25-2.5	1.0-2.0	4.5-12
Relación de recirculación	0	0-1	1-3, 2-1	1-4
Medio filtrante	minerales	minerales	mineral sintético	sintético
Necesidades Energéticas	2-4	2-8	6-10	10-20

$K_w / 10^3 \text{ m}^3$				
Moscas en el filtro	muchas	regular	pocas, las larvas son arrastradas	pocas o ninguna
Arrastre de sólidos	intermitente	intermitente	continuo	Continuo
Intervalos de dosificación	Inferior a 5 min. generalmente intermitente	15 a 60 seg. continuo	No más de 15 seg. continuo	Continuo
Porcentaje de remoción DBO_5	80-90	50-70	65-85	40-65
Efluente	usualmente generalmente nitrificado	parcialmente nitrificado	nitrificado a cargas bajas	nitrificado a cargas bajas

FUENTE: METCALF & EDDY, 1996.

III.4 Arreglo de filtros percoladores en la planta de tratamiento de aguas residuales.

III.4.1 Estructuras adyacentes.

El nivel de tratamiento primario que reciba el agua residual a la que se le dará un tratamiento secundario por medio de filtro percoladores, influye en el diseño y desempeño del mismo. A causa de los problemas de taponamiento y obstrucción que suelen presentarse en el medio del percolador, el afluente de un filtro percolador debe recibir un tratamiento primario eficiente. Es por esto que siempre precede un tanque sedimentador primario a un filtro percolador. De igual forma, la función de los tanques sedimentadores situados a continuación de los filtros percoladores es producir un efluente clarificado libre de humus, resultante del tratamiento biológico a que fue sometido el efluente. Por ésta razón es común llamarles también tanques clarificadores. El diseño de estos tanques es similar a los de sedimentación primaria, excepto en la que la carga de superficie se basa en el caudal de la planta más el de recirculación, menos el flujo de sólidos hacia el fondo del tanque con frecuencia ignorado.

Debido a lo anterior, es por lo que generalmente al referirse a un filtro percolador es común mencionar al sedimentador primario y al clarificador (figura 41).



Figura 41 Imagen de filtros percoladores con un clarificador en primer plano.

III.4.2 Recirculación.

La recirculación del efluente tratado para mezclarlo con el suministro de aguas residuales afluentes (figura 42), permite usar un método para equilibrar la carga hidráulica con la carga de nutrientes. Es posible aumentar la carga hidráulica sin un aumento concomitante en la carga de nutrientes, o se puede reducir la carga de nutrientes mientras que se mantiene la carga hidráulica, es decir, proporciona la oportunidad de uniformizar el caudal y las características del flujo aplicado. Reduce la concentración de nutrientes en el suministro de líquido en caso de aumentos bruscos de los mismos, y se utiliza en el tratamiento de aguas residuales muy concentradas que no se podrían alimentar al percolador sin una dilución previa. Permite utilizar con aguas residuales normales de una menor concentración, con más altas cargas de nutrientes que en una operación de un solo paso, ya que la acumulación de lamas está controlada por el aumento en la carga hidráulica.

Por lo general, el efluente tratado y recirculado se toma de la salida del tanque clarificador, más que directamente de la salida del percolador, ya que el uso del líquido decantado y libre de humus reduce el riesgo de obstruir el medio filtrante con la reintroducción adicional de humus. En las mejores circunstancias, la velocidad del flujo en el sistema puede mantenerse constante.



Figura 42 Imagen de conjunto de válvulas de recirculación para filtros percoladores.

La relación entre las tasas de flujo del líquido recirculado y el suministro de afluente se conoce como la relación de recirculación, cuya expresión matemática está dada por la siguiente ecuación:

$$(28) \quad S_o = \frac{Q * S_F + Q_R * S_e}{Q + Q_R} = \frac{S_F + R * S_e}{1 + R}$$

donde S_o = DBO o concentración de nutrientes en el suministro al percolador.

S_F = DBO o concentración de nutrientes del afluente.

S_e = DBO o concentración de nutrientes del efluente

Q = Gasto del afluente.

Q_R = Gasto de recirculación.

R = Relación de recirculación, Q_R / Q .

En etapas finales de tratamiento o de pulimento, la DBO en el efluente constituye usualmente el criterio dominante en la determinación de la relación de la recirculación. No obstante, otros factores pueden tener su importancia como por ejemplo, la necesidad de reducir la concentración de un determinado soluto por debajo de su nivel de toxicidad.

El proceso de recircular el efluente de un filtro rara vez se utiliza en plantas de filtros de carga baja, es una peculiaridad de la filtración rápida. Sus ventajas son:

- a) Permite la dosificación continua de los filtros, independientemente de las fluctuaciones de gastos manteniendo los filtros trabajando continuamente.
- b) Al mezclarse el agua del afluente con el agua de recirculación se reducen los malos olores.
- c) La recirculación provoca la siembra continua en el medio filtrante de nuevas células en la biomasa.
- d) Ayuda en el desprendimiento de la masa biológica gastada, reduciendo el grueso de la misma y controlando la producción de moscas en el medio filtrante.
- e) Diluye el agua residual afluente mejorando la eficiencia del proceso, aunque aumenta la carga hidráulica para un caudal determinado de agua residual.

Las desventajas que se pueden presentar con la recirculación son:

- a) Reduce la temperatura del agua de desecho, lo cual disminuye la actividad biológica en la biomasa.
- b) La recirculación aumenta la carga hidráulica pudiendo disminuir la eficiencia de los sedimentadores y clarificadores si se sobrepasan las condiciones de diseño.
- c) Se incrementan los costos por operación de bombeo.

- d) Si es excesiva, puede arrastrar al su paso por el medio filtrante una cantidad mayor de biomasa lo cual reduciría la eficiencia del tratamiento.

Por lo anterior, es importante mantener tanto la igualación del flujo como la de la carga de nutrientes.

III.4.3 Disposición de filtros percoladores en etapas con recirculación.

El proceso de recirculación puede efectuarse en una o en dos fases. Se recircula en una fase cuando en el sistema de tratamiento únicamente existe un solo filtro, mientras que se lleva la recirculación de dos fases cuando dentro del sistema existen dos filtros, los cuales se encuentran conectados en serie.

III.4.3.1 Filtros percoladores en una etapa.

En este sistema de filtración en una etapa (figura 43), el filtro percolador puede operar con o sin reciclado de efluente. El reciclado del efluente está indicado para obtener una calidad mayor. Si la DBO del afluente es mayor de 500 mg / l el reciclado resulta recomendable.

Las fluctuaciones de la carga orgánica en el agua residual son amortiguadas por los modelos de flujo mostrados en los esquemas *a, b, c, d, f, h*. La duración de dicho amortiguamiento varía en conjunto con la carga orgánica máxima y mínima del agua residual afluente y con el tiempo de retención del flujo de recirculación en el tanque sedimentador.

En los modelos de flujo mostrados en los esquemas *a y b*, el humus del clarificador es combinado con el flujo de recirculación y retornados al tanque primario por medio de las mismas bombas. Todos lo modelos de flujo restantes, excepto el *h*, el cual no tiene clarificador, requieren sistemas de bombeo por separado para la remoción del humus.

El modelo de flujo *e*, recicla el humus al filtro, pero este es poco si existe un

amortiguamiento menos de carga orgánica. Todos los modelos de flujo excepto el *e* y el *g*, recirculan el flujo a través de uno o más sedimentadores así como en el propio filtro percolador. Por este motivo, el flujo de recirculación debe ser tomado en cuenta para determinar la capacidad y otros factores de diseño para los tanques sedimentadores.

El modelo de flujo *g*, que cuenta sólo con el retorno de humus, y el modelo de flujo *h*, sin clarificador, no pueden proveer altos valores de biodegradación debido a su configuración. Esta configuración es similar a los modelos de flujo utilizados por percoladores de carga baja. El modelo de flujo *d*, el cual tiene modelos de flujo como en *a* y *c*, ha sido utilizado extensamente.

De lo anterior, el modelo de flujo *e*, es el preferido, ya que obtiene resultados similares a los demás, pero forma más económica. El modelo de flujo *e*, también es conocido como filtro accelo, el modelo de flujo *f*, se le conoce como biofiltro, y al modelo *c*, se le conoce también como aerofiltro.

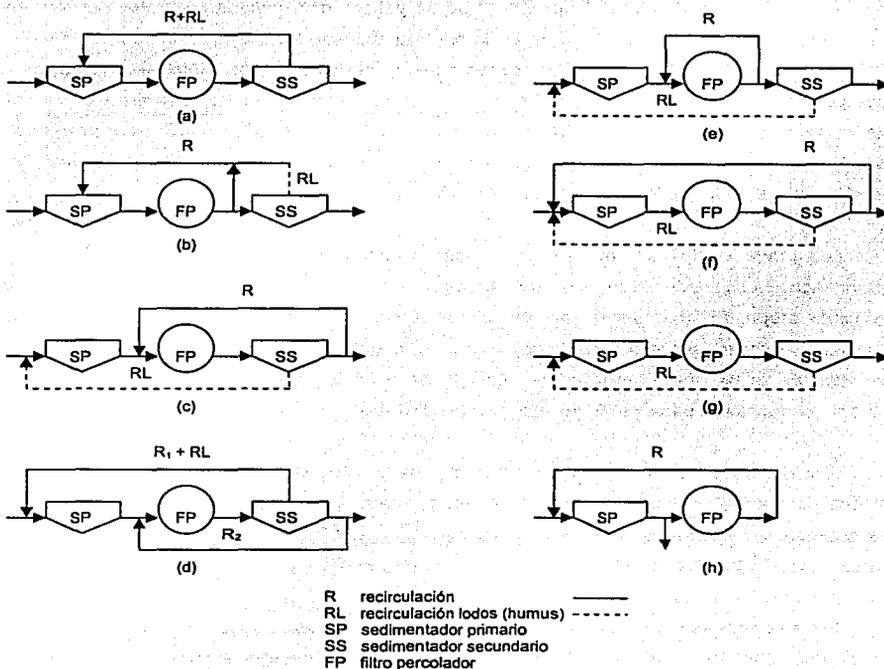


Figura 43 Diagramas de modelos de flujo para filtros percoladores en una etapa.

III.4.3.2 Filtros percoladores en dos etapas.

La técnica de doble filtración (figura 44), es un ejemplo de operaciones consecutivas burdas y de pulimento, usando dos percoladores en serie. El primer percolador se opera a una carga alta y el segundo a una carga baja. El percolador utilizado para la etapa burda debe tener un medio de empaque adaptado al considerable crecimiento de lamas producido por la carga alta. Los

medios plásticos ordenados son apropiados, pero se pueden usar medios minerales de un medio especialmente grueso (de 75 a 130 mm). En la primera etapa se elimina aproximadamente el 70% de la carga de nutrientes, y después de la remoción del humus en una etapa de separación, el líquido pasa a la segunda etapa donde se elimina casi todos los nutrientes remanentes, actuando como etapa de mejora del efluente. Se puede usar también la recirculación. Se recomienda que para la primera etapa, los rangos de carga sean aproximadamente de 1.6 a 2.3 kg de DBO / m³-día, y de 0.04 a 0.12 kg de DBO / m³-día para la segunda.

Los modelos de flujo mostrados en los esquemas *i*, *j*, *k* y *n* han sido usados más frecuentemente. Los modelos de flujo *i*, *m* y *n* se pueden usar en percoladores de carga baja para la segunda etapa. En muchas ocasiones, un percolador de carga baja sobrecargado ha sido reemplazado por un percolador de carga alta de pretratamiento, y un tanque sedimentador intermedio. En estos casos, el flujo de recirculación a través del percolador de carga baja, es solamente el necesario para mantener el flujo mínimo deseado.

En los modelos de flujo *j*, *k* y *l*, los que eliminan el tanque sedimentador intermedio, están enfocados a desempeñar un tratamiento por medio de una gran actividad biológica en el filtro percolador de la segunda etapa. Varias investigaciones han concluido en que el sedimentador intermedio no afecta adversamente desempeño del percolador.

Sin embargo, aguas residuales con altas concentraciones de orgánicos solubles, pueden producir una gran cantidad de sólidos biológicos que pueden afectar adversamente el filtro percolador de carga baja en la segunda etapa, si los sólidos no son eliminados en el sedimentador secundario.

En el modelo de flujo *j*, una parte de los humus sedimentables pasan del primer percolador a la segunda etapa. En el modelo *k*, una parte del efluente del sedimentador primario es desviada directamente al filtro de la segunda etapa, y en el modelo *l*, el efluente de la primera etapa es enviada directamente al segundo percolador y al flujo de recirculación no se le permite sedimentarse en un tanque.

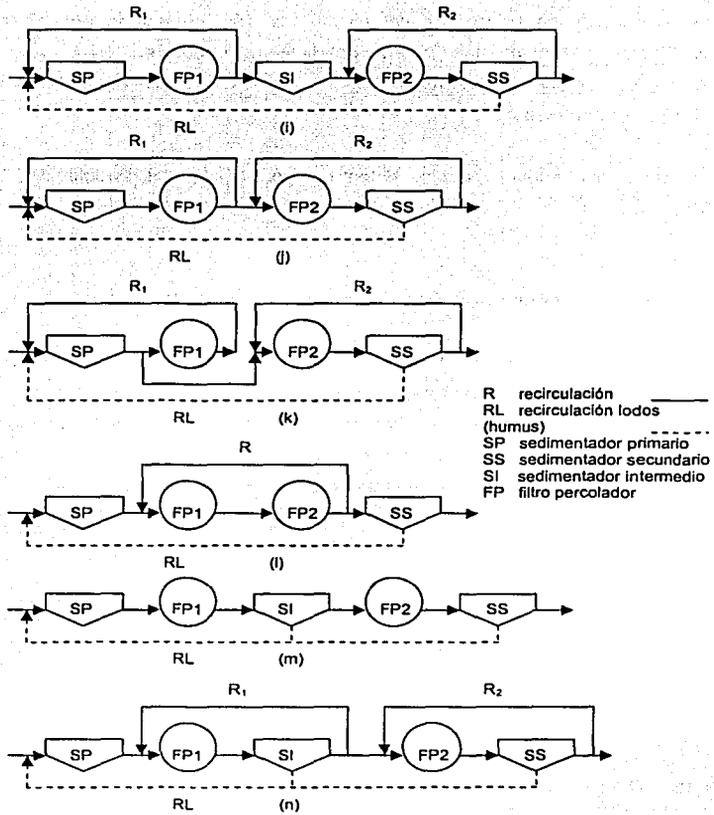


Figura 44 Diagramas de modelos de flujo para filtros percoladores en dos etapas.

El diseño de los sedimentadores en los sistemas de dos etapas se ve afectado por los caudales de recirculación. En los modelos *i*, *j*, *k* y *n*, se requiere que se tome en cuenta la inclusión de caudal de recirculación en el diseño del flujo del caudal en los tanques sedimentadores involucrados. En el modelo *l*, se emplea recirculación sin requerimientos adicionales de capacidad para el tanque sedimentador.

Basado en lo anterior, para los sistemas de dos etapas, los modelos de flujo *j*, *k* y *l*, son los más recomendables.

III.4.3.3 Filtros percoladores en doble filtración alternada.

El principio de la doble filtración alternada es similar al sistema de dos etapas, ya que presenta una secuencia de percoladores burdos y de pulimento. No obstante, los percoladores usados en la doble filtración alternada tienen medios filtrantes similares y la acumulación de lamas en la etapa burda se controla por la inversión periódica de la secuencia de las unidades. De este modo, cada unidad se somete a alimentación e inanición sucesivas

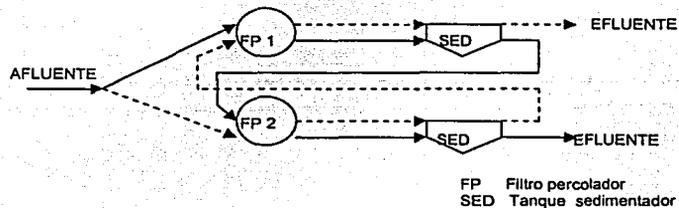


Figura 45 Diagramas del modelo de flujo para filtros percoladores con filtración alternada.

Las aguas residuales se aplican a una de las unidades a una tasa relativamente alta, y después de la sedimentación del humus, este efluente parcialmente purificado se aplica a la segunda unidad. En la primera unidad de la secuencia, el crecimiento de las lamas es rápido, y cuando esté cerca de quedar obstruida se invierte la secuencia. Luego, la lama acumulada se

agota por inanición ya que se alimenta con el líquido diluido parcialmente purificado. Este efecto se puede aumentar por recirculación. Por tanto, es importante que se elimine la mayor proporción de nutrientes en la primera etapa de manera que el agotamiento de las lamas se pueda llevar a cabo en la segunda. El período de la alternación depende de las características de las aguas residuales tratadas.

La mejora de este sistema se puede atribuir a la mejor ventilación obtenida con dos filtros separados, a la aireación adicional que tiene lugar en el asentamiento y la redistribución, a la mejor distribución del líquido en los medios y al más estrecho control de la acumulación de las lamas, permitido por este sistema. Para el tratamiento de aguas domésticas, las tasas de carga que utiliza este sistema se pueden aumentar a un rango de 0.32 a 0.47 kg de DBO / m³-día.

ANÁLISIS DE CRITERIOS DE DISEÑO DE UN FILTRO
PERCOLADOR

IV. ANÁLISIS DE CRITERIOS DE DISEÑO DE UN FILTRO PERCOLADOR

IV.1 Modelos de funcionamiento del filtro percolador.

El uso de los percoladores en el tratamiento de aguas residuales es un sistema establecido desde hace tiempo y se ha acumulado una considerable experiencia operacional del funcionamiento de los mismos, especialmente en el tratamiento a baja tasa de las aguas residuales domésticas. Basándose en esta experiencia, se han desarrollado cierto número de relaciones útiles, empíricas y semiempíricas, a fin de describir el funcionamiento del percolador en términos de los parámetros de operación. A causa de la compleja interrelación de las variables de los procesos que intervienen en el funcionamiento del filtro percolador, no existe un único modelo matemático ni físico que prediga el desempeño del mismo.

Entre los modelos desarrollados para determinar las ecuaciones que mejor representaran el funcionamiento de los filtros percoladores, y que derivaron en el desarrollo de fórmulas empíricas, se incluyen las determinadas por la Nacional Research Council, Great Lakes-Upper Mississippi River Board of State Sanitary Engineers, Velz, Rankin, Fairall, Stack, Schulze, Eckenfelder, Galler and Gotaas, Kornegay, Ten States Standard, además de análisis de plantas piloto en operación.

Para desarrollo de estos modelos teóricos a partir de sus principios fundamentales, se requirió de drásticas suposiciones de simplificación. La verificación de dichos modelos matemáticos con los modelos físicos a escala de laboratorios se lleva a cabo frecuentemente usando sistemas ideales, lo que contribuye a una incertidumbre en los resultados, lo que hace énfasis en las dificultades implícitas al verificar las suposiciones, usando sólo una metodología experimental. No obstante, los enfoques teóricos han conducido a una mayor comprensión de las fórmulas empíricas que son de gran uso en el diseño de los sistemas de percolación.

A continuación, se presentan tres métodos empíricos y uno de laboratorio, para el diseño de filtros percoladores, los cuales corresponden a los métodos más utilizados y referenciados para dicho propósito.

IV.2 Eficiencia de biofiltración.

Como se explica en el apartado II.4, existen varios factores ambientales y químicos, incluyendo el grado de recirculación del agua residual tratada, que afectan la actividad microbiana, por lo que la eficiencia de la biofiltración en un filtro percolador, depende de la interrelación de muchos factores que en la mayoría de las ocasiones están fuera del control por parte de los operadores de las plantas de tratamiento. Sin embargo, el principal objetivo del tratamiento de las aguas residuales obliga a cumplir con las exigencias establecidas por la normatividad en materia de la calidad del agua para la disposición final de la misma. Es en este sentido, en el cual podemos medir la eficiencia del tratamiento, al comparar las características del agua afluente al filtro percolador, con las características del agua tratada y las exigidas en la normativa vigente.

Debido a lo anterior, y a que un valor representativo de la calidad del agua residual es el de la DBO₅, una medida en la eficiencia del tratamiento se puede obtener mediante la siguiente relación:

$$(29) \quad E = \frac{S_o - S_e}{S_o} * 100$$

donde E = Eficiencia del tratamiento %.

S_o = DBO₅ o concentración de nutrientes del afluente al filtro percolador.

S_e = DBO₅ o concentración de nutrientes del efluente del filtro percolador.

Con respecto a la recirculación del agua tratada en los filtros percoladores, Galler y Gotaas, han demostrado que una relación de recirculación mayor de 4, no incrementa significativamente la eficiencia del tratamiento y generalmente impacta de manera importante en los costos de operación del sistema de tratamiento.

Aunado a lo anterior, debido a las características inestables de la película biológica y las impredecibles características hidráulicas, resulta muy difícil desarrollar un modelo cinético generalizado del filtro percolador. Como se observa en la figura 46, existen diversas alternativas para el tratamiento de aguas residuales, según el tipo de medio utilizado, carga y eficiencia en la

eliminación de DBO.

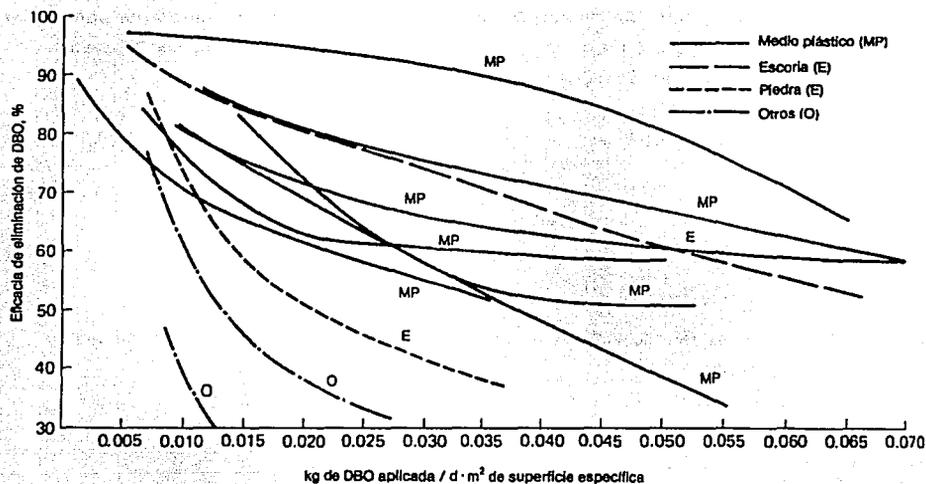


Figura 46 Eficiencia de eliminación de DBO₅ en función de la carga aplicada para diversas instalaciones de filtros percoladores (Datos de archivo Metcalf & Eddy).

IV.3 Método de diseño NRC.

La formulación de la NRC (National Research Council, 1946) se debe a los resultados de extensos análisis del funcionamiento de filtros percoladores con un medio filtrante de roca, en las plantas de tratamiento de agua residual en instalaciones militares en Estados Unidos, las cuales incluían filtros percoladores de baja tasa, una fase de alta tasa y dos fases de alta tasa.

El análisis de estos datos para medios filtrantes de roca, está basado en el hecho de que el tiempo de contacto entre el medio filtrante y la materia orgánica, depende de las dimensiones del filtro percolador, del número de recirculaciones y que a mayor contacto efectivo, mayor será la eficiencia del tratamiento. De cualquier modo, a mayor carga aplicada, menor será la eficiencia del

filtro. Por lo tanto, lo que principalmente determina la eficiencia de un filtro percolador es una combinación del contacto efectivo con la carga aplicada.

Para los filtros con medio filtrante de roca seleccionados para su estudio por parte de la NRC, la curva de eficiencia que mejor se ajusta a los puntos graficados dados por los parámetros carga aplicada – contacto efectivo (WVF) está dada por las siguientes ecuaciones:

Para la única o primera fase:

$$(30) \quad E1 = \frac{100}{1 + 0.443 * \left(\frac{W1}{VF}\right)^{1/2}}$$

donde E1 = Porcentaje de eficiencia en remoción de DBO₅ del tratamiento a través del primer filtro y clarificador.

W1 = Carga de DBO₅ en el primer filtro sin incluir recirculación, en kg/d.

V = volumen del medio filtrante en m³.

F = factor de recirculación dada por la siguiente ecuación:

$$(31) \quad F = \frac{1 + R}{(1 + 0.1 * R)^2}$$

donde R = Relación de recirculación, Q_R / Q.

Q = Gasto del afluente.

Q_R = Gasto de recirculación.

Para la segunda fase:

$$(32) \quad E2 = \frac{100}{1 + \frac{0.443}{1 - E1} * \left(\frac{W2}{VF}\right)^{1/2}}$$

donde E_2 = Porcentaje de eficiencia en remoción de DBO_5 del tratamiento a través del segundo filtro y clarificador.

W_2 = Carga de DBO_5 en el segundo filtro sin incluir recirculación, en kg/d.

V = volumen del medio filtrante en m^3 .

F = factor de recirculación.

E_1 = eficiencia de remoción de DBO_5 del tratamiento del primer filtro, como fracción.

Ambas ecuaciones (30) y (32), son empíricas, pero son acordes con el comportamiento observado en los filtros percoladores de las plantas de tratamiento, con y sin recirculación, en los que se considera la existencia de un tanque sedimentador antes de cada filtro percolador

El termino constante de 0.1 en la fórmula del factor de recirculación (31), toma en cuenta lo experimentalmente observado respecto a que la remoción de materia orgánica en el tratamiento, aparentemente decrece conforme aumentan las veces que se recircula el agua.

Así también debe ser tomada en cuenta la influencia de la temperatura en el desempeño de los filtros percoladores de alta tasa cuando sean aplicadas las fórmulas de la NRC en condiciones locales, ya que es probable que las ecuaciones hayan sido determinadas bajo condiciones de clima y temperatura correspondientes al verano.

El rango máximo de recirculación para la fórmula de la NRC es de 800 % aproximadamente.

La figura 47, ejemplifica el comportamiento de los filtros percoladores estudiados por la NRC y la similitud de comportamiento de las fórmulas deducidas.

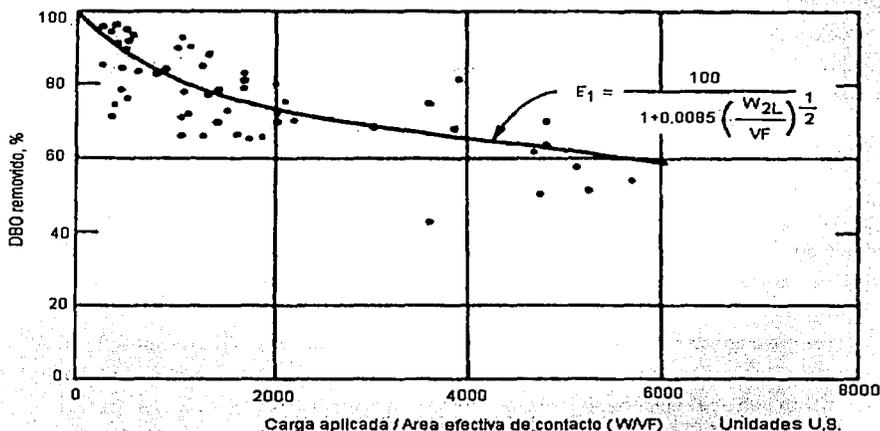


Figura 47 Comparación de datos de operación de filtros percoladores con la fórmula NRC.

IV.4 Método de diseño basado en las ecuaciones de Eckenfelder, Bruce & Merkens.

La formulación desarrollada por Eckenfelder y sus colaboradores, en el intento de que la misma sea aplicable a todo tipo de medio filtrante, tiene el propósito de obtener una relación entre la disminución de la DBO, la profundidad del filtro percolador, la carga hidráulica y las características del medio filtrante. Las dos suposiciones fundamentales aplicadas para este desarrollo son:

- a) El filtro percolador se considera un reactor de flujo pistón vertical.
- b) La disminución de la DBO sigue la cinética de las reacciones de primer orden.

Desarrollando Eckenfelder la fórmula que representa el desempeño de un filtro percolador en la remoción de la DBO característica de las aguas residuales municipales, basándose en una reacción de pseudo-primer orden, encontró la siguiente expresión:

$$(33) \quad -\frac{1}{X} \frac{dS}{dt} = kS$$

donde $(1/X) (dS/dt)$ = Índice constante de utilización del sustrato, masa/ (masa microbótica) x (tiempo).

(dS/dt) = constante de utilización del sustrato, masa / (volumen) x (tiempo).

k = constante de tratabilidad del sustrato determinado en laboratorio.

S = concentración del sustrato, masa / volumen.

Reordenando para integrar la ecuación (33) tenemos:

$$(34) \quad \int_{S_0}^{S_t} \frac{dS}{S} = -k \bar{X} \int_0^t dt$$

donde k = constante de tratabilidad del sustrato determinado en laboratorio.

\bar{X} = promedio de la concentración de la masa celular, masa / volumen.

S_t = concentración del sustrato después del tiempo de contacto t , masa / volumen.

S_0 = concentración del sustrato aplicado al filtro percolador, masa / volumen.

Integrando la ec. (34):

$$(35) \quad \frac{S_t}{S_0} = e^{-k \bar{X} t}$$

El promedio de la concentración de la masa celular, \bar{X} es proporcional a la superficie específica del medio filtrante, A_s , de esta manera:

$$(36) \quad \bar{X} \sim A_s$$

y si el tiempo principal de contacto, t , para un percolador está representado por:

$$(37) \quad t = \frac{CD}{Q_L^n}$$

donde t = tiempo principal de contacto.

D = profundidad del percolador.

Q_L = carga unitaria de líquido o carga hidráulica superficial.

C, n = constantes experimentales dependientes de las características del flujo y del medio de empaque.

Sustituyendo las ecuaciones (36) y (37) en la ecuación (35) y combinando las constantes k y C, tenemos la ecuación desarrollada por Eckenfelder (1970):

$$(38) \quad \frac{S_e}{S_o} = e^{-K' A^n \frac{D}{Q_L^n}}$$

Si se asume que el área superficial del medio permanece constante y además cuenta con una distribución uniforme de la capa microbiótica a través de la profundidad del filtro, la ecuación (38) puede ser simplificada combinando las constantes K' y A^n en una nueva constante K para resultar en la siguiente ecuación con los siguientes casos:

Sin recirculación:

$$(39) \quad \frac{S_e}{S_o} = e^{-K \frac{D}{Q_L^n}}$$

Con recirculación:

$$(40) \quad \frac{S_e}{S_i} = \frac{e^{-K \frac{D}{Q_L^n}}}{(1+R) - R * e^{-K \frac{D}{Q_L^n}}}$$

CAPITULO IV ANÁLISIS DE CRITERIOS DE DISEÑO DE UN FILTRO PERCOLADOR

- donde
- Se = concentración del sustrato del efluente del percolador, en mg/l.
 - So = concentración del sustrato aplicado al percolador sin recirculación, en mg/l.
 - Si = concentración del sustrato aplicado al percolador con recirculación, en mg/l.
 - K = constante de tratabilidad obtenida de laboratorio.
 - D = profundidad del percolador, en ft.
 - QL = carga unitaria de líquido o carga hidráulica superficial, en gpm/ft².
 - N = constante experimental correspondiente al medio filtrante.
 - R = relación de recirculación igual a Q_r / Q.

Estas ecuaciones son el modelo matemático de Eckenfelder de los filtros percoladores, que relacionan el % de DBO remanente con la profundidad del filtro D y la carga hidráulica Q_L. El parámetro K, para un medio específico, es función de la constante de tratabilidad k del sustrato, por lo cual, en las ecuaciones (39) y (40), $K = k \cdot C \cdot K' \cdot A s^m$. Para obtener un valor de K para diseño, lo mejor es obtener este valor de datos de laboratorio o de plantas piloto, u obtenerlo como referencia de los presentados en la tabla 22, 23 o 24, según el caso, debiéndose tomar en cuenta, que los valores de estas tablas fueron determinados a una temperatura de 20° C, y que son presentados como K₂₀.

El valor de K, es afectado por los cambios de temperatura, por lo que Howland desarrolló la siguiente ecuación dada por una relación tipo Arrhenius, para corregir la constante K, siendo la ecuación la siguiente:

$$(41) \quad K_T = K_{20} * 1.035^{(T-20)}$$

- donde
- K_T = constante de tratabilidad a la temperatura T, °C.
 - K₂₀ = constante de tratabilidad a 20°C.
 - T = temperatura, °C.

Además de lo anterior, basado en el análisis de datos obtenidos en la operación de filtro percoladores, Albertson encontró que la constante de tratabilidad debe ser corregida por profundidad cuando un valor de K determinado para una profundidad, va a ser aplicada en el diseño de un filtro percolador con una profundidad distinta. La corrección propuesta por Albertson

es la siguiente:

$$(42) \quad K_2 = K_1 * \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^X$$

donde K_1 = constante de tratabilidad correspondiente al filtro de profundidad 1.

K_2 = constante de tratabilidad correspondiente al filtro de profundidad 2.

D_1 = profundidad del filtro 1, en ft.

D_2 = profundidad del filtro 2, en ft.

X = 0.5 para filtros de medio rocoso

0.3 para filtros con medio sintético

Es importante mencionar que el valor de K para el diseño de filtros percoladores varía de acuerdo con las condiciones locales en las que fue determinado, además de que los valores dados en la literatura no están uniformizados para una profundidad, por lo que en la aplicación de estos valores, se deben tomar las reservas convenientes.

En las siguientes tablas, se pueden seleccionar valores de K_{20} para diversos tipos de medios de empaque, aguas residuales y profundidades.

Tabla 23 Valores de n y K_{20} para algunos medios filtrantes en aguas domésticas sedimentadas.

Tipo de medio de empaque.	Prof. ft	n	K a 20°C (1/min)
Flexirings 1 ½ plg	8	0.39	0.09
Escoria 2 ½ plg	6	0.84	0.021
Residuos 1 ½ a 2 ½ plg	6	1.00	0.014
Residuo 2 ½ plg	6	0.75	0.029
Roca 2 ½ a 4 plg	12	0.49	0.036
Granito 1 a 3 plg	6	0.40	0.059
Anillos Rasching ¾ plg	6	0.70	0.031

Anillos Rasching 1 plg	6	0.63	0.031
Anillos Rasching 1 ½ plg	6	0.306	0.078
Anillos Rasching 2 ¼ plg	6	0.274	0.08
Block alineado	6	0.345	0.048
Surfpac	21.6	0.50	0.05
Surfpac	12	0.45	0.05
Surfpac	21.5	0.50	0.045
Surfpac	21.5	0.50	0.088

FUENTE: ECKENFELDER (1970)

Tabla 24 Valores de n y K_{20} para diversos tipos de aguas residuales.

Tipo de agua residual.	Tipo de medio	n	K a 20°C (1/min)
Domestica	Surfpac	0.5	0.079
Enlatado de fruta	Surfpac	0.5	0.0177
Textil	Surfpac	0.5	0.0156 – 0.0394
Farmacéutica	Surfpac	0.5	0.0292
Rastro	Surfpac	0.5	0.0246
Industria minera (coque)	Surfpac	0.5	0.0211

FUENTE: ECKENFELDER (1970)

Tabla 25 Valores típicos de las constantes de tratabilidad para un filtro percolador de 20 pies con medio plástico.

Tipo de agua residual.	K
Domestica	0.065 – 0.10
Domestica y residuos alimenticios	0.060 – 0.08

Residuos de enlatado de frutas	0.020 – 0.05
Empacado de carne	0.030 – 0.05
Industria papelera	0.020 – 0.04
Procesadora de papas	0.035 – 0.05
Refinería	0.020 – 0.07

FUENTE: METCALF & EDDY.

En el caso de filtros percoladores con medio de empaque de roca, la profundidad es usualmente muy pequeña comparada con el diámetro del mismo, y el modelo de mezclado en este caso pudiera aproximarse al de un sistema completamente mezclado. Un balance de masa de lo anterior nos resultaría en la siguiente ecuación:

$$(43) \quad Q * S_o = Q * S_e - \frac{k' * A_s * S_e * V'}{S_o} + V' \frac{dS}{dt}$$

donde: V' = volumen del reactor.

en un estado estable, $dS/dt = 0$, por lo tanto:

$$(44) \quad S_e = \frac{S_o}{1 + \frac{k' * A_s * V'}{S_o * Q}}$$

la proporción V'/Q es el tiempo de reacción, el cual es casi igual al tiempo de retención del agua residual en los filtros percoladores, dado por la fórmula siguiente:

$$(45) \quad \Theta = D^b * \left(\frac{A}{Q}\right)^a * k_1$$

sustituyendo la ec. (45) en la ec. (44), tenemos:

$$(46) \quad S_e = \frac{S_o}{1 + \frac{k * A_s * k_1 * h^b}{S_o} * \left(\frac{A}{Q}\right)^a}$$

cuando el rango de DBO inicial es muy estrecho, la ecuación (45) toma la forma

$$(47) \quad S_e = \frac{S_o}{1 + K * D^b * \left(\frac{A}{Q}\right)^a}$$

donde S_o = DBO₅ aplicado al percolador en mg / l.

S_e = DBO₅ del efluente del percolador en mg / l.

$K = k * k_1 * A_s = 5.358$ para unidades del SI

$b = 0.67$

$a = 0.5$

Q = gasto del afluente al filtro percolador en m³ / día

A = área de la sección transversal del filtro percolador en m²,

D = profundidad del medio de empaque en m.

IV.5 Procedimiento de diseño con datos de planta piloto o semipiloto.

Los filtros percoladores han sido tradicionalmente diseñados con base en alguna de las fórmulas existentes, sin embargo, el uso de estudios de tratabilidad para el diseño de filtros percoladores se ha restringido a filtros percoladores con medio sintético, con unidades piloto que los fabricantes de los medios sintéticos proveen en modo de renta.

Los estudios de tratabilidad para la evaluación de los parámetros de diseño para medios de roca o piedra son inusualmente llevados a cabo.

El propósito básico de un estudio de laboratorio es la evaluación de las variables que intervienen en el desempeño del filtro percolador, consecuentemente, los estudios de tratabilidad deben tener la duración suficiente para considerar las diversas variables que afectan la eficiencia del filtro percolador: carga de DBO, carga hidráulica, recirculación, y temperatura del agua residual y temperatura ambiente.

De igual forma, se puede obtener información sobre el comportamiento probable de las aguas residuales en el laboratorio con equipo especializado o por la adaptación relativamente simple de los aparatos estándar de laboratorio a los requerimientos de la investigación. Aún así, es difícil diseñar un modelo a escala de laboratorio de un filtro percolador. La falta de uniformidad espacial de los nutrientes (isotrofismo) y de la biología asociada no permite una derivación considerable de las dimensiones verticales de las unidades a escala completa, excepto mediante la colocación de un número suficientemente grande de lechos tipo en serie para igualar a la profundidad total del lecho. Tampoco puede existir una reducción significativa en el tamaño y naturaleza del medio de contacto.

El comportamiento básico de purificación se identifica generalmente en pruebas por lotes, y el comportamiento real de las plantas de tratamiento en pruebas a flujo continuo o en estado estable, frecuentemente denominadas técnicas de cultivo continuo en los estudios de laboratorio de tratamiento biológico. El propósito de la mayoría de las pruebas de laboratorio consiste en determinar la magnitud de los coeficientes incluidos en las formulaciones del tratamiento, como los valores de n y K . Debido a que se puede suponer la conversión del sustrato en poblaciones microbiana, las ecuaciones que describen el crecimiento cinético y la utilización del sustrato, se convierten en ecuaciones descriptivas de la formación de películas y floculos, así como de los requerimientos pertinentes de oxígeno, es a partir de aquí, de donde se realizan los estudios de laboratorio para obtener dichas constantes.

Uno de los métodos para obtener los datos necesarios a partir de modelos de filtros pilotos o semipiloto es el que se explica a continuación.

IV.5.1 Modelo de filtro percolador semipiloto.

Este método consiste en elaborar un modelo físico en laboratorio como el que se muestra en la figura 48 a continuación.

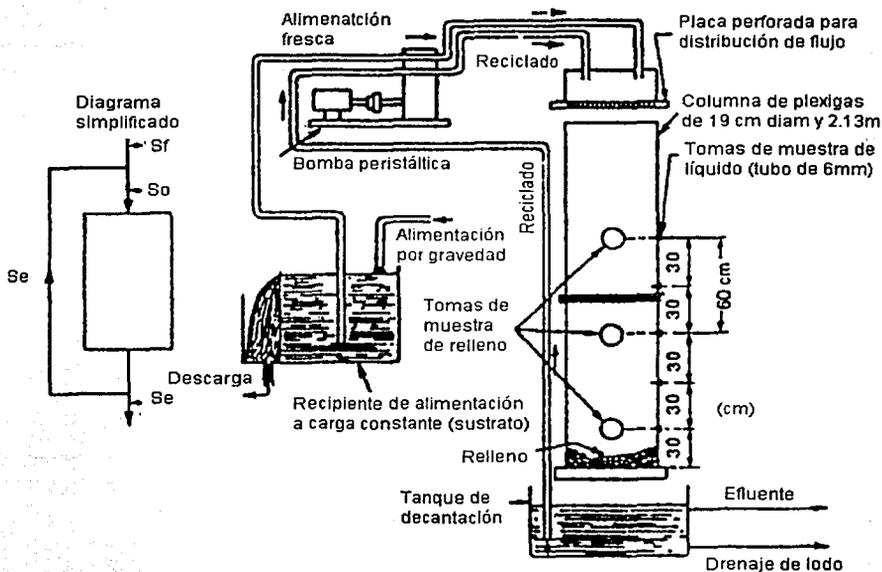


Figura 48. Modelo de laboratorio de filtro percolador semipiloto.

En este modelo, el agua residual contenida en el recipiente de alimentación se bombea mediante una bomba peristáltica hasta una placa perforada de distribución del flujo. Allí se mezcla con la corriente de reciclado procedente del tanque de decantación.

Como etapa previa, es necesario generar un limo aclimatado sobre el relleno del filtro. Esta

operación puede durar desde varios días hasta algunas semanas, dependiendo del tipo de agua residual. Se toman muestras periódicamente en el relleno y en el líquido y se llevan a cabo determinaciones de la DBO. Se registran los valores de equilibrio de la DBO.

El procedimiento para obtener los datos básicos es:

- a) Seleccionar tres o cuatro cargas hidráulicas, $m^3/(s) (m^2)$. Para profundidades de filtro $D > 3m$ con relleno plástico, se eligen caudales de 3.5×10^{-4} a $2.8 \times 10^{-3} m^3/(s) (m^2)$.
- b) Para cada caudal se muestrean por lo menos tres profundidades. Los análisis de las muestras se expresan normalmente en forma de % de la DBO remanente, esto es, $S_e / S_o \times 100$. Se llevan también a cabo determinaciones del pH, del nitrógeno de Kjeldhal y de la temperatura del agua.

Con estos datos, se elabora para su fácil interpretación y manejo, una tabla o matriz de tamaño correspondiente al número de muestreos realizados, (3x3 o 4x4).

IV.5.2 Tratamiento de los datos obtenidos con objeto de determinar las constantes n y K .

Para determinar los valores de n y K , procederemos con los siguientes pasos:

Paso 1 En el papel semilogarítmico se representa el porcentaje de DBO remanente ($S_e \times S_o \times 100$) en función de la profundidad (D) para cada valor de la carga hidráulica (Q_L). De la ec. (39) se deduce que:

$$(48) \quad \ln\left(\frac{S_e}{S_o}\right) = -K * \frac{D}{Q_L^n} = -\left(\frac{K}{Q_L^n}\right) * D$$

Con esta ecuación se obtiene una familia de líneas rectas. El valor absoluto de sus

pendientes corresponde a K / Q_L^n .

Paso 2 En papel doble logarítmico se representan los valores absolutos de las pendientes para cada una de las líneas del paso 1 en función de Q_L . Debido a que:

$$(49) \quad |\text{pendiente}| = K / Q_L^n$$

tenemos:

$$(50) \quad \log |\text{pendiente}| = \log K - n \log Q_L$$

Se obtiene una línea recta en cada punto correspondiente a uno de los ensayos. La pendiente de dicha recta nos permite encontrar el valor de n de acuerdo a la ec. (50).

Paso 3 Se llevan a cabo los cálculos siguientes:

- 1.- Se determinan los valores de Q_L^n para cada ensayo utilizando el valor de n determinado en el paso 2.
- 2.- Se calculan los valores de D / Q_L^n para cada ensayo a cada profundidad.
- 3.- Se construye un cuadro de D / Q_L^n en función de $(S_e \times S_o) \times 100$ a la vista de lo presentado en los cuadros originados en el inciso a) del subtítulo anterior y del cuadro originado en el inciso 2) del paso 3.

Paso 4 En papel logarítmico se representan los valores de $(S_e \times S_o) \times 100$ en función de D / Q_L^n . De la ec. (48) se obtiene:

$$(51) \quad \ln \left(\frac{S_e}{S_o} \right) = -K * \frac{D}{Q_L^n}$$

La pendiente de la recta así obtenida corresponde al valor de K. De esta forma, los valores de las constantes n y K para el modelo matemático han sido ya obtenidos.

IV.5.3 Aplicación de los resultados al diseño de un filtro percolador a escala real.

Al aplicar los valores de las constantes n y K ya obtenidos, diferenciaremos entre los siguientes dos casos.

IV.5.3.1 Caso 1 Filtro percolador sin reciclado.

El diseño se basa en la ec. (39), obteniéndose los valores de K y n en la forma descrita en el subtítulo anterior.

Paso 1 Se calcula la carga hidráulica requerida Q_L para una disminución específica de la DBO correspondiente a la relación S_e/S_o necesaria. Se supone un valor para la profundidad D y se resuelve la ecuación para hallar la carga hidráulica Q_L , $m^3 / (s) (m^2)$. Resolviendo la ecuación (39) para Q_L , se obtiene:

$$(52) \quad Q_L = \left(-K * \frac{D}{\ln(S_e / S_o)} \right)^{\frac{1}{n}}$$

De la ec. (52) se puede obtener la carga hidráulica Q_L en $m^3 / (s) (m^2)$.

Paso 2 El área requerida del filtro A es:

$$(53) \quad A = \frac{Q}{Q_L} = \frac{\frac{m^3}{s}}{\frac{m^3}{s * m^2}} = m^2$$

Paso 3 El diámetro del filtro viene dado por la ecuación:

$$(54) \quad diam = \left(\frac{4 * A}{\Pi} \right)^{\frac{1}{2}}$$

IV.5.3.2 Caso 2 Filtro percolador con reciclado.

Paso 1 Se calcula S_o dado por la ec. (28), para un valor específico de la relación de recirculación R.

Paso 2 Se resuelve la ec. (39) para Q_L , con lo que se obtiene una ecuación similar a la ec. (52) a partir de la cual se calcula la carga hidráulica. Los pasos 1 y 2 pueden combinarse para obtener una ecuación de donde se resuelva el valor de Q_L , el resultado final es:

$$(55) \quad Q_L = \left(\frac{-K * D}{\ln \left(\frac{(S_e / S_F) * (1+r)}{1+r * (S_e / S_F)} \right)} \right)^{\frac{1}{n}}$$

Paso 3 En consecuencia, el área requerida del filtro, A, es:

$$(56) \quad A = \frac{Q * (r+1)}{Q_L}$$

Paso 4 El diámetro del filtro se calcula a partir de la ec. (54).

IV.6 Método de diseño de la CNA de 1994.

IV.6.1 Características del proceso.

Para las normas de diseño de filtro percoladores de la CNA de 1994, los filtros percoladores pueden ser clasificados en las siguientes categorías:

- a) Filtros percoladores con roca : Baja, Media y Alta Tasa.
 b) Filtros percoladores con Medio Sintético : Alta, Muy Alta y Desbaste.

De los cuales, en las siguientes tablas se presentan las características típicas de estos tipos de filtros, y de los medios de empaque respectivamente.

Tabla 26 Características de filtros percoladores según CNA 1994.

Parámetro	Tasa Baja	Tasa Media	Tasa Alta	Tasa Muy Alta	Desbaste
Medio de Empaque	Roca	Roca	Roca o Sintético	Sintético	sintético
Carga Hidráulica ($l/s \cdot m^2$)	0.01 - 0.04	0.04 - 0.11	0.11 - 0.42	0.16 - 1.0	0.7 - 2.0
Carga Orgánica ($kg/d \cdot m^3$)	0.08 - 0.40	0.24 - 0.48	0.4 - 4.8	Hasta 4.8	Mas de 1.6
Recirculación	Mínima	Generalmente	Siempre	Generalmente	Generalmente
Moscas	Si	Variable	Variable	Pocas	Pocas
Descarga de Lodos	Intermitente	Variable	Continua	Continua	Continua

Profundidad (m)	1.8 – 2.4	1.8 – 2.4	Roca: 0.9 – 2.4 Sint: hasta 9.0	Hasta 12	0.9 - 6.0
Remoción de DBO (%)	80 – 85	50 – 70	65 – 80	65 – 85	40 – 65

FUENTE: CNA, DIR GRAL NORMAS 1994.

Tabla 27 Características típicas de distintos medios para filtros percoladores según CNA 1994.

Medio de empaque	Tamaño		Densidad Aparente	Área específica		Vacios
	mm	plg	Kg / m ³	m ² / m ³	pie ² / pie ³	%
Roca						
Pequeña	25-65	1-2 ½	1250-1450	55-70	17-21	40-50
Mediana	100-120	4-5	800-1000	40-50	12-15	50-60
Plástico						
Convencional			30-100	80-1000	24-30	94-97
Alta Densidad			30-100	100-120	30-70	94-97

FUENTE: CNA, DIR GRAL NORMAS 1994.

IV.6.2 Eficiencia del proceso.

La eficiencia en remoción de DBO del proceso de filtración biológica, se estima con dos ecuaciones:

- a) Una expresión empírica desarrollada a partir de los resultados medidos en filtros de piedra en instalaciones militares de los Estados Unidos:

$$(57) \quad EF = \frac{1}{1 + 0.44 * \left(\frac{Co}{F}\right)^{0.5}}$$

donde Co = Carga orgánica por unidad de volumen, kg de DBO_5 / m^3 -día.

F = Factor de recirculación, $F = 1 + R$.

R = Relación de recirculación, Q_R / Q .

- b) Una expresión teórica derivada de la ecuación de la cinética de primer orden de la bio-oxidación:

$$(58) \quad \frac{S_e}{S_o} = e^{-k_r * t_c}$$

donde:

$$(59) \quad t_c = c * A_s * \frac{D}{q^n}$$

por lo tanto:

$$(60) \quad \frac{S_e}{S_o} = e^{-k_r * A_s * \frac{D}{q^n}}$$

La constante n es función de las características hidráulicas del medio de empaque y se ha estimado entre 0.5 y 0.65. La constante K_{20} , es la constante de la biodegradabilidad de la DBO en el agua, para aguas residuales domésticas su valor se ha estimado entre 0.002 y 0.003 (l/seg-m²)^{0.5}.

La dependencia de K_{20} con la temperatura se puede expresar con la siguiente ecuación:

$$(61) \quad K_T = K_{20} * 1.035^{(T-20)}$$

La ecuación cinética (para $n = 0.5$) se puede expresar incorporando el efecto de la recirculación con la siguiente expresión:

$$(62) \quad \frac{Se}{So} = \frac{e^{-K_T * A_s * \frac{D}{q_r^{0.5}}}}{(1+R) - R * e^{-K_T * A_s * \frac{D}{q_r^{0.5}}}}$$

y la profundidad del filtro puede obtenerse con la siguiente ecuación:

$$(63) \quad D = \frac{\ln\left(\frac{Se + Se * R}{So + Se * R}\right) * q_r^{0.5}}{K_T * A_s}$$

donde

S_e = DBO disuelta del efluente, mg/l.

S_o = DBO total del afluente, mg/l.

K_{20} = Constante cinética de bio-oxidación a 20° C.

K_T = Constante cinética de bio-oxidación a T °C.

R = Relación de recirculación, Q_R / Q .

A_s = Área específica del medio, m² / m³.

D = Profundidad efectiva del filtro, m.

q = Carga hidráulica por unidad de superficie horizontal del filtro, sin considerar el gasto de recirculación, l/s-m².

q_r = Carga hidráulica por unidad de superficie horizontal del filtro, considerando el

CAPITULO IV ANÁLISIS DE CRITERIOS DE DISEÑO DE UN FILTRO PERCOLADOR

gasto de recirculación, l/s-m².

Si la recirculación es cero (R = 0), la última ecuación se simplifica como se indica a continuación:

$$(64) \quad D = \frac{\ln \frac{S_e}{S_o} * q^{0.5}}{K_r * A_s}$$

La recirculación, no siempre se emplea. La recirculación es indispensable para garantizar la humidificación completa del medio filtrante cuando se presentan reducciones en el gasto de entrada, y se recomienda cuando el influente tiene altas concentraciones de DBO. Una ecuación propuesta para calcular la tasa de recirculación empleada en manuales de diseño de la EPA (Environment Protection Agency), es la siguiente:

$$(65) \quad R = 0.004 * S_o - 0.6$$

donde:

Tabla 28 Valores de R dada una So para la fórmula de recirculación de la EPA.

So	mg/l	150	200	300	400	500	600
R	%	0	20	60	100	140	180

En Alemania, la velocidad de giro de los brazos distribuidores está especificada en función del gasto de agua descargado en cada giro del brazo distribuidor. Este parámetro, identificado como SK (Spulskraft) se expresa en mm de agua por cada vuelta del brazo y se calcula con la siguiente ecuación:

$$(66) \quad SK = \frac{q_r}{a * n}$$

donde a = número de brazos.

n = la velocidad de rotación del brazo, 1 / tiempo.

Para filtros de roca de baja tasa el valor de SK debe ser de 2 a 6 mm por vuelta, para filtros de alta tasa el valor de SK debe ser considerablemente mayor, pudiendo llegar de 60 a 600 mm/vuelta. La tabla siguiente muestra valores típicos de SK para condiciones normales de operación y para operaciones eventuales de lavado de lodos acumulados en el filtro percolador.

Tabla 29 Valores típicos de SK según la carga orgánica.

Carga Orgánica Kg/d-m ³	SK (mm/vuelta)	
	Diseño	Lavado de lodos
< 0.8	25 a 75	100
0.8	50 a 150	150
1.2	75 a 225	225
1.6	100 a 300	300
2.4	150 a 450	450
3.2	200 a 600	600

IV.6.3 Consumo de energía.

El único consumo de energía del proceso es en el bombeo e las aguas para la alimentación del filtro. La carga de bombeo es igual a altura del filtro, más pérdidas por fricción, más la carga hidráulica necesaria para la operación del brazo distribuidor.

El consumo de energía por unidad de volumen puede ser estimado con la siguiente ecuación:

$$(67) \quad \text{Energía consumida (kw-h/m}^3\text{)} = 0.004 * h$$

donde h = la carga total de bombeo en m.

IV.7 Selección del criterio de diseño.

Dadas las diferencias significativas en el tamaño de los filtros, de acuerdo al criterio empleado, es necesario analizar las características relevantes de cada uno de ellos, a fin de seleccionar aquel que satisfaga, en mayor medida, los requerimientos de acuerdo a las necesidades del tratamiento biológico.

Los factores relevantes que diferencian las diversas ecuaciones de diseño de los filtros percoladores, son las siguientes:

- Los valores de eficiencia de las ecuaciones empleadas en el método de la NRC estuvieron basados en aguas sedimentadas antes del filtro; sólo se experimentó con filtros percoladores de medio mineral, con aguas residuales militares, las cuales son muy homogéneas y estables en cuanto a su composición; el efecto de la temperatura en el desempeño de los filtros no está considerada; las fórmulas indican que la carga orgánica tiene mayor influencia en la eficiencia del tratamiento que la carga hidráulica aplicada; su aplicación está limitada para aguas residuales municipales concentradas debido a que no se incluye ningún factor que considere los diferentes rangos de tratabilidad del agua residual y, solamente tres parámetros pueden variarse: el número de etapas, la tasa de recirculación y el volumen del medio.
- Las ecuaciones desarrolladas por Eckenfelder, Bruce y Merkens, fueron desarrolladas con el intento de que sean aplicables cualquier medio filtrante, ya que expresan su papel en la eficiencia del proceso la tratabilidad del agua residual, la temperatura, las características del medio de empaque, la profundidad del medio, la carga hidráulica y una relación entre la disminución de la DBO; el desarrollo de la fórmula se deduce del crecimiento biológico de la lama y se tomaron en cuenta aguas sedimentadas y no sedimentadas.
- El procedimiento de diseño con datos de planta piloto o semipiloto, es un procedimiento enfocado a medios sintéticos; toman en cuenta la mayoría de las variables que afectan el procedimiento del tratamiento biológico tanto del agua residual como del ambiente; se puede experimentar con varios tipos de medios sintéticos, obteniendo una comparación de eficiencias entre ellos; al requerirse un laboratorio especializado para llevar a cabo los estudios, es

necesario una mayor inversión económica y se requiere de mayor tiempo para la fase de diseño; al usar este procedimiento, el diseño resultante no se adecuará a otras características ambientales o de composición de aguas residuales debido al control estricto de las variables que se obtienen en un laboratorio; la ecuación base de diseño es la desarrollada por Eckenfelder y colaboradores.

- El método de diseño empleado por la CNA, utiliza la ecuación de la NRC, con las condiciones que ésta establece, así también, emplea la ecuación desarrollada por Eckenfelder, ajustando los valores de las variables a las condiciones que la experiencia ha demostrado; se incluyen los efectos de la recirculación directamente en las fórmulas así como también establece valores para la recirculación en función de los valores de S_0 del influente; es el único método que establece valores para la velocidad de rotación del brazo distribuidor en función de la carga orgánica.

EJEMPLO DE DISEÑO DE UN FILTRO PERCOLADOR

V. EJEMPLO DE DISEÑO DE UN FILTRO PERCOLADOR.

V.1 Selección del método de diseño.

Para ejemplificar la aplicación de los criterios de diseño de filtros percoladores anteriormente expuestos, se tomarán los métodos de la NRC, Eckenfelder y CNA con el fin de realizar una comparación entre ellos, analizando posteriormente los resultados obtenidos.

V.2 Consideraciones de diseño.

Para la realización del ejemplo, se tomarán como datos de diseño para los tres métodos, los siguientes parámetros:

- Medio filtrante de roca.
- Gasto y población de diseño dados por la tabla 30 correspondiente al año 2015.
- Altura del medio filtrante igual a 2.40 m según criterio de la CNA.
- Diámetro máximo del filtro percolador igual a 60.0 m.
- La CNA estima una aportación de 54 mg/hab-día de DBO₅, lo que para una población de 381026 habitantes, con una dotación de agua de 250 l/hab-día, y una captación del sistema de alcantarillado municipal correspondiente al 80% del suministro de agua potable, arroja un gasto medio de diseño para el sistema de tratamiento de 882 l/s, con una DBO₅ del afluente, So, de 270 mg/l.
- Una DBO₅ del efluente, Se, de 30 mg / l exigida por norma.
- Una temperatura de 20.85° C.
- A falta de consideración de algún parámetro de diseño en los métodos de NRC y Eckenfelder, en medida de lo posible, se aplicarán los resultantes del método de la CNA, para que de ésta forma, sea posible realizar una comparación entre los resultados de los métodos de diseño de filtros percoladores, tomando como criterio base el método de diseño de la CNA.

La población y el gasto de proyecto corresponden a una ciudad con los siguientes datos:

Tabla 30 Predicción de población y gasto de agua residual doméstica a tratar.

Año	Población en número de habitantes	Q de dotación l/s	Q medio para tratamiento l/s
2000	277750	804	643
2001	283666	821	657
2002	289708	838	671
2003	295879	856	685
2004	302181	874	699
2005	308618	893	714
2006	315191	912	730
2007	321905	931	745
2008	328761	951	761
2009	335764	972	777
2010	342916	992	794
2011	350220	1013	811
2012	357680	1035	828
2013	365298	1057	846
2014	373079	1080	864
2015	381026	1103	882

V.2.1 Ejemplo con el método de la CNA.

Bases de diseño:

Q = 882 l/s

So = 270 mg/l

Se = 30 mg/l

Temperatura = 20.85° C.

Medio de empaque: roca pequeña.

Altura del filtro (D) = 2.40 m, de tabla 25

$K_{20} = 0.0025 \text{ (l/seg-m}^2\text{)}^{0.5}$, valor medio entre 0.002 y 0.003 $\text{(l/seg-m}^2\text{)}^{0.5}$.

Área específica del medio (A_s) = $70 \text{ m}^2/\text{m}^3$, de tabla 26

Ecuación de diseño, ec. (62):

$$\frac{S_e}{S_o} = \frac{e^{-K_T \cdot A_s \cdot \frac{D}{q_r^{0.5}}}}{(1 + R) - R \cdot e^{-K_T \cdot A_s \cdot \frac{D}{q_r^{0.5}}}}$$

Diseño del proceso:

Primera fase:

Determinando K_T con la ec. (61):

$$K_T = K_{20} \cdot 1.035^{(T-20)} = 0.0025 \cdot 1.035^{(20.85-20)} = 0.00257$$

Determinando el factor de recirculación con la ec. (65):

$$R = 0.004 \cdot S_o - 0.6 = 0.004 \cdot 270 - 0.6 = 0.48$$

Determinando una carga hidráulica superficial:

$q_o = 0.42 \text{ (l/s - m}^2\text{)}$, según tabla 25, escogiendo un filtro de tasa alta.

Determinando una carga hidráulica superficial incluyendo recirculación q_r :

$$q_r = q_o \cdot (1 + R) = 0.42 \cdot (1 + 0.48) = 0.6216 \text{ (l/s - m}^2\text{)}$$

Obteniendo el área superficial de la sección transversal del filtro percolador:

$$A = Q / q_o = 882 / 0.42 = 2100.00 \text{ m}^2$$

Suponiendo que el número de filtros de la primera fase:

número de filtros = 1

Determinando el diámetro del filtro percolador:

$$\text{diámetro} = (4 \cdot A / 3.1416)^{1/2} = (4 \cdot 2100 / 3.1416)^{1/2} = 51.70 \text{ m, valor aceptable}$$

ya que los diámetros comerciales de los brazos distribuidores llegan hasta los 60 m.

Determinando el volumen del medio de empaque:

$$\text{Volumen medio} = A * D = 2100 * 2.40 = 5040 \text{ m}^3.$$

Sustituyendo valores en ec. (62) para encontrar Se:

$$\frac{Se}{So} = \frac{e^{-K_r * A_s * \frac{D}{q_r^{0.5}}}}{(1 + R) - R * e^{-K_r * A_s * \frac{D}{q_r^{0.5}}}} = \frac{Se}{270} = \frac{e^{-0.00257 * 70 * \frac{2.40}{0.6216^{0.5}}}}{(1 + 0.48) - 0.48 * e^{-0.00257 * 70 * \frac{2.40}{0.6216^{0.5}}}}$$

en donde Se = 130 mg/l en el efluente, por lo que una segunda etapa será necesaria para alcanzar el valor de 30 mg/l en el efluente exigido por norma.

Determinando carga orgánica por volumen del filtro en kg DBO / m³ - día:

$$\text{Carga org. X vol.} = So * Q * 0.0864 / \text{vol. medio} = 270 * 882 * 0.0864 / 5040 = 4.08$$

Determinando la eficiencia de la primera fase:

$$E = (So - Se) / So * 100 = (270 - 130) / 270 * 100 = 51.85 \%$$

Segunda fase:

Para la segunda fase, se tienen las siguientes condiciones:

$$So = 130 \text{ mg/l}$$

$$Se = 30 \text{ mg/l}$$

R = 0, según tabla 27.

las demás condiciones permanecen iguales, sustituyendo estos valores en la ec. (60) tenemos:

$$\frac{30}{130} = e^{-0.00257 * 70 * \frac{2.40}{q^{0.56}}}$$

de donde $q = 0.087 \text{ (l/s} - \text{m}^2\text{)}$.

Determinando el área de la sección transversal del filtro si $q = q_0$ debido a que $R = 0$, tenemos:

$$A = Q / q_0 = 882 / 0.87 = 10138 \text{ m}^2$$

Suponiendo que el número de filtros de la segunda fase:

$$\text{número de filtros} = 4$$

Determinando el diámetro del filtro percolador:

$$\text{diámetro} = (4 \cdot A / 3.1416 / 4)^{(1/2)} = (4 \cdot 10138 / 3.1416 / 4)^{(1/2)} = 56.80 \text{ m, valor aceptable ya que los diámetros comerciales de los brazos distribuidores llegan hasta los 60 m.}$$

Determinando el volumen del medio de empaque por filtro:

$$\text{Volumen medio} = A / 4 \cdot D = 10138 / 4 \cdot 2.40 = 6084.20 \text{ m}^3.$$

Determinando carga orgánica por volumen del filtro en kg DBO / m³ - día:

$$\text{Carga org. X vol.} = S_0 \cdot Q \cdot 0.0864 / \text{vol. medio} = 130 \cdot 882 \cdot 0.0864 / 6084.20 = 1.63$$

Determinando la eficiencia de la primera fase:

$$E = (S_0 - S_e) / S_0 \cdot 100 = (130 - 30) / 130 \cdot 100 = 76.92 \%$$

Por las características de los filtros de la segunda fase, se tratan de filtros percoladores de alta tasa. Terminando con esto el diseño de los filtros percoladores por el método de la CNA.

V.2.2 Ejemplo con el método de la NRC.**Bases de diseño:**

$$Q = 882 \text{ l/s}$$

$$S_o = 270 \text{ mg/l}$$

$$S_e = 30 \text{ mg/l}$$

Altura del filtro (D) = 2.40 m, de método de CNA

Diseño del proceso:**Primera fase:**

Ecuación de diseño primera fase ec. (30):

$$E1 = \frac{100}{1 + 0.443 * \left(\frac{W1}{VF}\right)^{1/2}}$$

F = factor de recirculación dada por la ecuación (31):

$$F = \frac{1 + R}{(1 + 0.1 * R)^2}$$

R = 0.48 según método CNA, entonces F = 1.3475.

Determinando la carga orgánica aplicada al filtro percolador en kg DBO / día:

$$W1 = S_o * Q * 0.0864 = 270 * 882 * 0.0864 = 20575.30$$

Igualando la eficiencia entre el método de CNA y NRC para determinar así el diámetro del filtro percolador, se obtiene:

E1 = 51.85 % por lo tanto despejando de la ec. (30) la variable V, se tiene:

$$(68) \quad V = \frac{W1}{F * \left(\frac{\frac{100}{E1} - 1}{0.443} \right)^2}$$

sustituyendo valores, se tiene:

$$V = \frac{20575.30}{1.3475 * \left(\frac{\frac{100}{51.85} - 1}{0.443} \right)^2} = 3474.80 \text{ m}^3$$

si $V = A * D$, y $D = 2.40$, entonces $A = 3474.80 / 2.40 = 1447.83 \text{ m}^2$

Suponiendo que el número de filtros de la primera fase:

número de filtros = 1

Determinando el diámetro del filtro percolador:

diámetro = $(4 * A / 3.1416)^{1/2} = (4 * 1447.83 / 3.1416)^{1/2} = 42.93 \text{ m}$, valor aceptable ya que los diámetros comerciales de los brazos distribuidores llegan hasta los 60 m.

Determinando carga orgánica por volumen del filtro en $\text{kg DBO} / \text{m}^3 - \text{día}$:

Carga org. X vol. = $S_o * Q * 0.0864 / \text{vol. medio} = 270 * 882 * 0.0864 / 3474.80 = 5.92$

Debido a que se diseñó la primea fase con misma eficiencia que en el método de la CNA, se requiere de una segunda etapa para cumplir con el valor de S_e requerido.

Segunda fase:

Ecuación de diseño segunda fase, ec.(32):

$$E2 = \frac{100}{1 + \frac{0.443}{1 - E1} * \left(\frac{W2}{VF}\right)^{1/2}}$$

Si para la segunda fase la DBO₅ del afluente es de 130 mg/l, y la DBO₅ del efluente debe ser de 30 mg/l, la eficiencia requerida es de:

$E2 = (130 - 30) / 130 * 100 = 76.92 \%$, que es la misma que fue requerida en la segunda fase del método de la CNA.

Determinando la carga orgánica aplicada al filtro percolador en kg DBO / día:

$$W2 = So * Q * 0.0864 = 130 * 882 * 0.0864 = 9906.62$$

Para este caso, se selecciona una relación de recirculación $R = 2$, por lo tanto $F = 2.0833$

Despejando el valor de V de la ec. (32), se tiene:

$$(69) \quad V = \frac{W2}{F * \left(\frac{100 - E2}{\left(\frac{0.443 * E2}{1 - E1} \right)} \right)^2}$$

en donde sustituyendo valores se tiene:

$$V = \frac{9906.62}{2.0833 * \left(\frac{100 - 76.92}{\left(\frac{0.443 * 76.92}{1 - 0.5185} \right)} \right)^2} = 44709.05 \text{ m}^3$$

si $V = A * D$, y $D = 2.40$, entonces $A = 44709.05 / 2.40 = 18628.77 \text{ m}^2$

Suponiendo que el número de filtros de la segunda fase:

número de filtros = 7

Determinando el diámetro del filtro percolador:

diámetro = $(4 * A / 3.1416 / 7)^{(1/2)} = (4 * 18636.45 / 3.1416 / 7)^{(1/2)} = 58.21$ m, valor aceptable ya que los diámetros comerciales de los brazos distribuidores llegan hasta los 60 m.

Determinando carga orgánica por volumen del filtro en kg DBO / m³ - día:

Carga org. X vol. = $So * Q * 0.0864 / \text{vol. medio} * 7 = 130 * 882 * 0.0864 / 44709.05 * 7 = 1.55$

V.2.3 Ejemplo con el método de Eckenfelder.

En el caso de diseño de filtros percoladores con las fórmulas del método de Eckenfelder, existen dos opciones, el diseño con la ecuación (39) o (40) y con la ecuación (47). Para efectos de comparación entre métodos, se presentan ambas opciones.

Método A

Utilizando la fórmula (47) con los mismos datos utilizados, se obtiene lo siguiente:

Para la primera fase:

$So = 270$ mg/l

$Se = 130$ mg/l

$Q = 882$ l/s = 76204.80 m³ / día

$K = 5.358$ valor de fórmula

$a = 0.5$ valor de fórmula

$b = 0.67$ valor de fórmula

$D = 2.40$ m del método de CNA

E = 51.85 % del método de CNA

Despejando A de la ec. (47) se obtiene:

$$(70) \quad A = Q * \left(\frac{\frac{S_o}{S_e} - 1}{K * D^b} \right)^{\frac{1}{a}}$$

sustituyendo valores, se obtiene:

$$A = 76204.80 * \left(\frac{\frac{270}{130} - 1}{5.358 * 2.40^{0.67}} \right)^{\frac{1}{0.50}} = 952.50 \text{ m}^2$$

Determinando el diámetro del filtro percolador suponiendo un filtro percolador:

diámetro = $(4 * A / 3.1416)^{1/2} = (4 * 18636.45 / 3.1416)^{1/2} = 34.82 \text{ m}$, valor aceptable ya que los diámetros comerciales de los brazos distribuidores llegan hasta los 60 m.

Determinando el volumen del medio de empaque por filtro:

Volumen medio = $A * D = 952.50 * 2.40 = 2286 \text{ m}^3$.

Determinando carga orgánica por volumen del filtro en $\text{kg DBO} / \text{m}^3 - \text{día}$:

Carga org. X vol. = $S_o * Q * 0.0864 / \text{vol. medio} = 270 * 882 * 0.0864 / 2286 = 9.0$

Para la segunda fase:

$S_o = 130 \text{ mg/l}$

$S_e = 30 \text{ mg/l}$

$Q = 882 \text{ l/s} = 76204.80 \text{ m}^3 / \text{día}$

$K = 5.358$ valor de fórmula

a = 0.5 valor de fórmula

b = 0.67 valor de fórmula

D = 2.40 m del método de CNA

E = 76.92 %

sustituyendo estos valores en la ec. (70) se obtiene lo siguiente:

$$A = 76204.80 * \left(\frac{\frac{130}{30} - 1}{5.358 * 2.40^{0.67}} \right)^{\frac{1}{0.50}} = 9125.39 \text{ m}^2$$

Determinando el diámetro del filtro percolador suponiendo cuatro filtros percoladores:

diámetro = $(4 * A / 3.1416 / 4)^{(1/2)} = (4 * 9125.39 / 3.1416 / 4)^{(1/2)} = 53.90 \text{ m}$, valor aceptable ya que los diámetros comerciales de los brazos distribuidores llegan hasta los 60 m.

Determinando el volumen del medio de empaque por filtro:

Volumen medio = $A / 4 * D = 9125.39 / 4 * 2.40 = 5475.23 \text{ m}^3$.

Determinando carga orgánica por volumen del filtro en kg DBO / m³ - día:

Carga org. X vol. = $So * Q * 0.0864 / \text{vol. medio} = 130 * 882 * 0.0864 / 5475.23 = 1.81$

Método B

Para la primera fase:

Utilizando la fórmula (40) con los mismos datos utilizados, se obtiene lo siguiente:

Se = 130 mg/l.

So = 270 mg/l.

K = 0.036 según tabla 22.

$$D = 2.40 \text{ m, } 7.87 \text{ ft.}$$

$$Q = 13981.50 \text{ gpm} = 882 * 60 / 3.785$$

$$n = 0.49 \text{ según tabla 22}$$

seleccionando una relación de recirculación $R = 0.48$

$$Si = 224.59 \text{ mg/l. obtenido de la ec. (28) igual a } Si = (So + R * Se) / (1 + R)$$

Corrigiendo el valor de K por temperatura según ec. (41):

$$K_T = K_{20} * 1.035^{(T-20)} = 0.036 * 1.035^{(20.85 - 20)} = 0.037$$

Corrigiendo el valor de K_T por profundidad según ec. (42) tomando x el valor de 0.5 para filtros de medio rocoso y con datos de la profundidad D_1 de la tabla 22:

$$K_2 = K_1 * \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^x = 0.037 * \left(\frac{12}{7.87}\right)^{0.5} = 0.0456$$

despejando Q_L en la ec. (40) se obtiene:

$$(71) \quad Q_L = \left(\frac{-K * D}{\text{Ln} \left(\frac{Se * (1 + R)}{Si + R * Se} \right)} \right)^{\frac{1}{n}}$$

sustituyendo valores en la ec. (71):

$$Q_L = \left(\frac{-0.0456 * 7.87}{\text{Ln} \left(\frac{130 * (1 + 0.48)}{224.59 + 0.48 * 130} \right)} \right)^{\frac{1}{0.49}} = 0.80$$

si $Q_L = Q / A$, entonces $A = Q / Q_L$, por lo tanto:

$$A = Q / Q_L = 13981.50 / 0.80 = 17476.87 \text{ ft}^2$$

Determinando el diámetro del filtro percolador suponiendo un filtro percolador:

diámetro = $(4 * A / 3.1416)^{(1/2)} = (4 * 17476.87 / 3.1416)^{(1/2)} = 149.17 \text{ ft} = 45.48 \text{ m}$,
valor aceptable ya que los diámetros comerciales de los brazos distribuidores llegan hasta los 60 m.

Determinando el volumen del medio de empaque por filtro:

$$\text{Volumen medio} = A * D = 17476.87 * 7.87 = 137542.97 \text{ ft}^3 = 3897.77 \text{ m}^3.$$

Determinando carga orgánica por volumen del filtro en kg DBO / m³ - día:

$$\text{Carga org. X vol.} = S_o * Q * 0.0864 / \text{vol. medio} = 270 * 882 * 0.0864 / 3897.77 = 5.28$$

Para la segunda fase:

Para la segunda fase, los datos son los siguientes:

$$S_e = 30 \text{ mg/l.}$$

$$S_o = 130 \text{ mg/l.}$$

K = 0.0456 según corrección calculada en la primera fase.

D = 2.40 m, 7.87 ft del método de la CNA

$$Q = 13981.50 \text{ gpm} = 882 \text{ l/s}$$

$$n = 0.49 \text{ según tabla 22}$$

seleccionando una relación de recirculación R = 0.35

$$S_i = 104.07 \text{ mg / l. obtenido de la ec. (28) igual a } S_i = (S_o + R * S_e) / (1 + R)$$

sustituyendo valores en la ec. (71):

$$Q_L = \left(\frac{-0.0456 * 7.87}{\text{Ln} \left(\frac{30 * (1 + 0.35)}{104.07 + 0.35 * 30} \right)} \right)^{\frac{1}{0.49}} = 0.114$$

si $Q_L = Q / A$, entonces $A = Q / Q_L$, por lo tanto:

$$A = Q / Q_L = 13981.50 / 0.114 = 122644.73 \text{ ft}^2$$

Determinando el diámetro del filtro percolador suponiendo cuatro filtros percoladores:

diámetro = $(4 * A / 3.1416 / 4)^{(1/2)} = (4 * 122644.73 / 3.1416 / 4)^{(1/2)} = 197.58 \text{ ft} = 60.23 \text{ m}$, valor aceptable ya que los diámetros comerciales de los brazos distribuidores llegan hasta los 60 m.

Determinando el volumen del medio de empaque por filtro:

Volumen medio = $A / 4 * D = 122644.73 / 4 * 7.87 = 241303.50 \text{ ft}^3 = 6838.20 \text{ m}^3$.

Determinando carga orgánica por volumen del filtro en kg DBO / m³ - día:

Carga org. X vol. = $So * Q * 0.0864 / \text{vol. medio} = 130 * 882 * 0.0864 / 6838.20 = 1.45$

V.3 Comparación y análisis de resultados.

Con el objetivo de realizar un análisis de los resultados obtenidos en el diseño de filtros percoladores por lo métodos antes expuestos, se elabora una tabla de comparación de resultados de dichos métodos, la cual, se presenta a continuación:

Tabla 31 Comparación de resultados obtenidos por lo métodos de la CNA, NRC y Eckenfelder para los datos de ejemplo.

Parámetros	Métodos			
	CNA	NRC	Método A	Eckenfelder Método B
Primera Fase				
Gasto Q (l/s)	882	882	-	-
Gasto Q (m ³ /d)	-	-	76204.80	-
Gasto Q (gpm)	-	-	-	13981.50
DBO So (mg/l)	270	270	270	270
DBO Se (mg/l)	130	130	130	130
DBO Si (mg/l)	-	-	-	224.59
Temp. (°C)	20.85	-	-	20.85
Recirculación R	0.48	0.48	-	0.48
E (%)	51.85	51.85	51.85	51.85
K ₂₀	0.0025	-	-	0.036
K _T	0.00257	-	-	0.037
K	-	-	-	0.0456
Área específica del medio (m ² /m ³)	70	-	-	-
Carga hidráulica superficial q _r (l/s-m ²)	0.6216	-	-	-
Carga hidráulica	-	-	-	0.80

CAPITULO V

EJEMPLO DE DISEÑO DE UN FILTRO PERCOLADOR

superficial				
Q_L (gpm/ft ²)				
Área por filtro	2100.0	1447.83	952.50	1624.48
A (m ²)				
Profundidad	2.4	2.4	2.4	2.4
D (m)				
Diámetro x filtro	51.70	42.93	34.82	45.48
(m)				
Volumen de				
medio por filtro	5040.0	3474.80	2286.0	3897.77
(m ³)				
Cantidad de filtros	1	1	1	1
requeridos				
Carga orgánica				
por volumen por	4.08	5.92	9.0	5.28
filtro				
(kg/m ³ -d)				

Segunda Fase

Gasto Q (l/s)	882	882	-	-
Gasto Q (m ³ /d)	-	-	76204.80	-
Gasto Q (gpm)	-	-	-	13981.50
DBO So (mg/l)	130	130	130	130
DBO Se (mg/l)	30	30	30	30
DBO Si (mg/l)	-	-	-	104.07
Temp. (°C)	20.85	-	-	20.85
Recirculación R	0.0	2.0	-	0.35
E (%)	76.92	76.92	76.92	76.92
K ₂₀	0.0025	-	-	0.036
K _T	0.00257	-	-	0.037
K	-	-	-	0.0456
Área específica	70.0	-	-	-

del medio (m^2/m^3)				
Carga hidráulica superficial	0.087	-	-	-
q_r ($l/s-m^2$)				
Carga hidráulica superficial	-	-	-	0.11
Q_L (gpm/ft^2)				
Área por filtro A (m^2)	2534.50	2661.25	2281.35	2849.98
Profundidad D (m)	2.4	2.4	2.4	2.4
Diámetro x filtro (m)	56.80	58.21	53.90	60.0
Volumen de medio por filtro (m^3)	6084.20	6387.0	5475.23	6838.20
Cantidad de filtros requeridos	4	7	4	4
Carga orgánica por volumen por filtro (kg/m^3-d)	1.63	1.55	1.81	1.45

De los resultados anteriores, para la primera etapa, se observa que el método que arrojó el diámetro del filtro percolador más pequeño y por lo tanto más económico, fue el método A de Eckenfelder. Lo anterior se debe al tipo de sistema considerado para el desarrollo de la fórmula del método A, el cual supone un sistema completamente mezclado, lo cual puede resultar incierto debido a las características del flujo influidas por el tipo de medio, además de no considerar la temperatura como factor esencial, ni las características del agua residual a tratar, los cuales son factores de importancia para el tratamiento de tipo biológico, ya que de ello depende la eficiencia

de tratamiento del sistema, influenciada por la recirculación del agua tratada, la cual tampoco está incluida como variable del método.

Bajo las mismas consideraciones se encuentran las fórmulas desarrolladas por la NRC, la cuales, recordando un poco, fueron desarrolladas a partir de diversas observaciones de instalaciones situadas en latitudes semejantes y con características de agua residual muy uniformes en cuanto a su composición o muy concentradas, aunque toma en cuenta la recirculación, su utilidad puede considerarse como de referencia de valor medio entre los métodos.

El método de la CNA está basado en la fórmula desarrollada por Eckenfelder, por lo que es de esperarse resultados semejantes, sin embargo, los resultados del método B de Eckenfelder, resultan ser mas conservadores que los de la CNA, esto es debido a la variable del área específica considerada en el método de la CNA y no así en el de Eckenfelder. Esto conduce a analizar otros parámetros entre estos métodos, como el impacto económico y operativo del sistema de tratamiento debido a la recirculación. Debiendo tomar en cuenta también la normatividad vigente, ya que al ser un método de la CNA, su aplicación puede ser reglamentaria, debido a que es el método que ofrece más confiabilidad sobre los demás, lo anterior, en perjuicio de los beneficios económicos que se crean al ser el método menos económico en el aspecto constructivo. Un aspecto a favor de estos dos métodos, es que ambos toman en cuenta las características del medio filtrante y del agua residual a tratar tanto en características como en carga hidráulica, además de considerar las variaciones en la rapidez de la tratabilidad del agua residual en el sistema de tratamiento. El inconveniente de ambos métodos radica en la necesidad de determinar dos variables en laboratorio, la cuales influyen de manera importante en el resultado final del método.

Los métodos que así lo permiten, resultan muy sensibles a la relación de recirculación del agua residual en el sistema, recomendándose mantener la relación de recirculación en nivel adecuado tanto económica como operativamente.

Como ya se mencionó anteriormente, el diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales por medio de un laboratorio, involucra un aumento significativo en los costos de planeación, así como la consecuente desventaja que existe en cuanto al tiempo requerido de

diseño. Sin embargo, representan las opciones mas recomendadas debido a que consideran diversas variables que se encuentran involucradas en el proceso de tratamiento.

V.4 Diseño hidráulico de los brazos distribuidores.

El sistema de distribución de agua residual de los filtros percoladores, está diseñado para distribuirla de manera uniforme sobre el medio de empaque en una cantidad predeterminada por cada unidad de área superficial del mismo medio de empaque, lo que se llama carga hidráulica.

En el continente americano es común el uso de sistemas de distribución rotatorios (figura 49). Estos distribuidores usualmente tienen dos o cuatro brazos que giran alrededor de un poste o columna central, sostenidos por medio de tirantes al poste central para conservar su posición.

Estos sistemas de distribución pueden ser propulsados por un motor, o propulsados por la reacción que generan los chorros de agua al salir por las boquillas de los mismos brazos, llamándose en este caso brazos autopropulsados.



Figura 49 Imagen mostrando el movimiento del brazo provocado por la reacción del chorro.

Las velocidades de giro de los brazos distribuidores oscilan entre 0.5 y 2 rpm para sistemas de distribución de diámetro pequeños y grande respectivamente. Los autores Metcalf y Eddy dan como referencia que la velocidad periférica de un distribuidor de dos brazos se encuentra en el rango de 0.5 a 3.7 m/min. La velocidad de rotación del sistema se reduce de manera proporcional al número de brazos.

Para sistemas de distribución con un diámetro de 4.5 a 70 m, y con boquillas sobre el mismo brazo, suelen tener brazos con un diámetro de 95 mm. Estos brazos se encuentran como mínimo a 15 cm sobre la superficie del medio de empaque o más alto si existe la posibilidad de formación de hielo o acumulación de nieve. La velocidad de los brazos debe ser mayor de 0.3 a 0.6 m/s para prevenir el deposito de partículas en su interior.

El área servida por los brazos incrementa al cuadrado de la distancia desde el poste central del filtro percolador, para mantener una distribución uniforme del agua residual en el filtro, se requiere la siguiente condición:

$$(72) \quad \frac{Q}{A} = \frac{Q_0}{A_t} \quad \text{ó} \quad Q = Q_0 * \frac{l^2}{L^2}$$

donde Q = gasto descargado sobre el área A , limitada por una distancia l desde el centro.

A_t = área total de la superficie del área

Q_0 = gasto dentro del brazo distribuidor

L = longitud del brazo

El flujo en el brazo distribuidor a cualquier distancia l es:

$$(73) \quad Q_l = Q_0 - Q = Q_0 - Q_0 * \frac{l^2}{L^2}$$

La ecuación de Darcy – Weisbach puede ser usada para calcular el gradiente hidráulico en el brazo distribuidor como sigue:

$$(74) \quad S = \frac{dh}{dl} = \frac{f}{D} * \frac{v^2}{2g} = \frac{f}{2r} * \frac{Q^2 l}{2gA^2 p} = \frac{f}{4} * \frac{Q^2 l}{\pi^2 gr^5}$$

$$(75) \quad -\frac{dh}{dl} = k * Q^2 * l$$

donde S = es la pendiente del gradiente de la energía

h = carga total de energía

Ap = área del brazo distribuidor

D = diámetro del brazo distribuidor

r = radio del brazo distribuidor

f = coeficiente de fricción (en función de la rugosidad y del número de Reynold)

$$k = \frac{f}{4\pi^2 r^5 g}$$

El número de Reynold varía a causa de la velocidad variante del flujo en el brazo distribuidor. Un solo valor de f puede ser escogido para simplificar los cálculos, después de una revisión del número de Reynold que puede ser alcanzado en cada sección del brazo distribuidor, sustituyendo la ec. (73) en la ec. (75) e integrando, se tiene:

$$(76) \quad h_L = -\int_{h_o}^{h_t} dh = kQo^2 * \left[\int_0^L dl - \frac{2}{L^2} * \int_0^L l^2 dl + \frac{1}{L^4} \int_0^L l^4 dl \right] = 0.59 * k * L * Qo^2$$

donde ho y ht = carga total de energía inicial y final respectivamente

hl = pérdida de energía en la longitud L

El gasto Ql, en el brazo distribuidor no varía de forma uniforme, sino es una forma escalonada en relación con la distancia entre las boquillas. La divergencia de las líneas de flujo a lo largo del brazo distribuidor, se debe a que el flujo se expande para ocupar completamente la sección transversal del brazo en cada boquilla, lo que ocasiona turbulencia y una pérdida adicional de energía.

La pérdida de carga desde un punto l hasta el final del brazo puede ser aproximada por la siguiente relación de pérdida de energía:

$$(77) \quad \Delta h_{l-L} = zkQ_l^2 * (L-l)$$

De la ec. (75), si z es similar a 0.6 y la relación para la pérdida de carga desde el centro a un punto l es:

$$(78) \quad hf = 0.6k[LQ_o^2 - (L-l)Q_l^2]$$

El flujo a través de una boquilla está relacionado con la carga de presión estática en la boquilla por la ecuación hidráulica de orificios, que es:

$$(79) \quad q = C_d a \sqrt{2gh_s}$$

donde q = gasto de descarga

Cd = coeficiente de descarga

a = área de la boquilla

h_s = carga de presión estática en el punto l

Un balance de la energía para el sistema de distribución debe contener términos referentes a la pérdida de carga, carga de energía cinética resultante de la velocidad dentro del brazo, y una carga de energía cinética debida a la rotación del distribuidor en conjunto con la carga de presión estática. La velocidad en cualquier punto l es calculada por la ec. (73) dividiéndola por el área de la sección transversal del brazo, Ap, como sigue:

$$(80) \quad v_l = v_o - v_o \left(\frac{l^2}{L^2} \right)$$

La carga causada por la rotación del distribuidor es:

$$(81) \quad hc = \frac{v_c^2}{2g} = \frac{\omega^2 l^2}{2g} = \frac{\left(\frac{2\pi N}{60} \right)^2 l^2}{2g} = 5.59 * 10^{-4} N^2 l^2$$

donde hc = carga causada por la fuerza centrífuga

w = velocidad angular

N = rpm del brazo distribuidor

Nótese que la carga centrífuga es adquirida a lo largo de la longitud del brazo. La carga estática en cualquier punto esta determinada por:

$$(82) \quad h_{it} = h_o - 0.6kLQ_o^2 + 0.6k(L-l)Q_l^2 + 5.59 * 10^{-4} N^2 l^2 - \frac{v_l^2}{2g}$$

ó también la siguiente ecuación puede ser utilizada:

$$(83) \quad h_{it} = h_o - \sum h_{ii} + 5.59 * 10^{-4} N^2 l^2 - \frac{v_l^2}{2g}$$

donde h_{ii} = suma de las pérdidas de carga entre boquillas desde el principio del brazo hasta la distancia l .

La distancia entre boquillas es determinada graficando el gasto Q vs. L de acuerdo con la ecuación (73) y la línea de forma escalonada representa el gasto actual en el brazo. Los escalonamientos ocurren en cada boquilla y son iguales a la descarga de cada boquilla. El área de cada boquilla puede ser regulada para proveer un determinado gasto (figura 50).

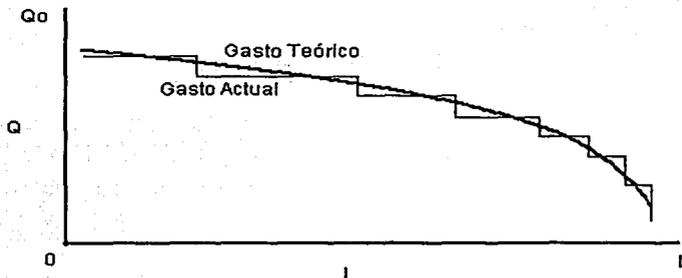


Figura 50 Distribución de gasto ideal y actual en el brazo distribuidor.

En la práctica, es más común usar un tamaño de boquilla constante. En este caso, el método antes descrito es usado para obtener la presión estática de distribución en el brazo con la ec. (82). Usando la ec. (79), la descarga a través de cada boquilla es calculada, y la distancia entre ellas es determinada por la correspondencia entre los escalonamientos de la descarga que han sido calculadas con la ec. (79) (figura 51).



Figura 51 *Imagen mostrando la variación del gasto en cada boquilla.*

Con los valores de q y el nuevo espaciamiento, se repiten los cálculos comenzando con el cálculo de la carga estática. Usualmente sólo son necesarias dos o tres iteraciones para obtener la distancia entre boquillas, existiendo la posibilidad de compensar estas distancias para su ubicación en los otros brazos para maximizar la distribución del flujo sobre el filtro.

También existe la opción de disminuir la sección transversal del brazo a lo largo del mismo, lo que resultará en un gradiente hidráulico más favorable, logrando así una distribución del flujo más uniforme. El sistema de distribución es abastecido de agua residual por medio de una bomba o de una caja de carga por medio de sifones (figura 52).

Ambos sistemas de abastecimiento deben considerar en su diseño, las fluctuaciones que pudieran haber en el gasto de afluente.



Figura 52 Sistema de bombeo y caja de carga para filtros percoladores.

La emisión de chorros en las boquillas de los brazos distribuidores causará un movimiento de rotación del brazo distribuidor. De un análisis de momentos en el plano horizontal para un orificio i se tiene:

$$(84) \quad T_i = l_i F_i = \rho q_i v_i l_i$$

donde T = torque
 F = fuerza
 ρ = densidad del agua
 v = velocidad del chorro

$$(85) \quad T = \sum T_i = \sum \rho q_i v_i l_i$$

Si el torque resultante es demasiado bajo para vencer la resistencia del movimiento por fricción y hacer rotar al sistema distribuidor a la velocidad requerida, entonces será necesaria una asistencia mecánica o será necesario proveer una mayor carga (ho). La carga mínima para una autopropulsión es de 30 a 36 cm. Si la velocidad del distribuidor es muy alta, entonces las boquillas

de los brazos distribuidores no descargarán un chorro en forma horizontal.

Se deben realizar cálculos para determinar un gasto mínimo y máximo para la operación del filtro percolador, a fin de realizar las adecuaciones pertinentes para la correcta operación del filtro percolador. Estas adecuaciones pueden ser la implantación de tanques dosificadores si el gasto resulta pequeño, o en el caso de distribuidores de cuatro brazos, pueden ser operados con solamente dos brazos, situación que se da raramente.

V.5 Aspectos constructivos del filtro percolador.

V.5.1 Ingeniería básica.

La definición de los procesos que en su conjunto integran la planta de tratamiento, constituyen un aspecto fundamental, ya que las diferentes combinaciones de éstos demandan diferente área y tipo de terreno, así como costos de inversión, operación y mantenimiento. Para lo anterior, los datos básicos a considerar para el diseño de un sistema de tratamiento biológico con filtros percoladores son: gasto, calidad del agua a tratar; calidad del efluente, o eficiencia de remoción esperada, topografía y tipo de suelo.

Es de gran importancia, la realización de estudios preliminares para la determinación del tipo de sistema de tratamiento que se utilizará, así como de la configuración de las estructuras adyacentes a un sistema de filtros percoladores (figura 53), como pueden ser las siguientes:

- a) Canal de rejas
- b) Canal desarenador
- c) Cárcamo de bombeo
- d) Sedimentador primario
- e) Filtro percolador
- f) Sedimentador secundario
- g) Tanque de contacto de cloro
- h) Espesador de lodos
- i) Digestor aerobio

j) Lechos de secado

Igual de importante es determinar el gasto generado de aguas residuales y la calidad promedio de dichas aguas de la población en donde se ubicará el sistema de tratamiento, para determinar el tamaño adecuado de las estructuras que constituirán la misma, con el fin de satisfacer los requerimientos exigidos por las normas correspondientes.

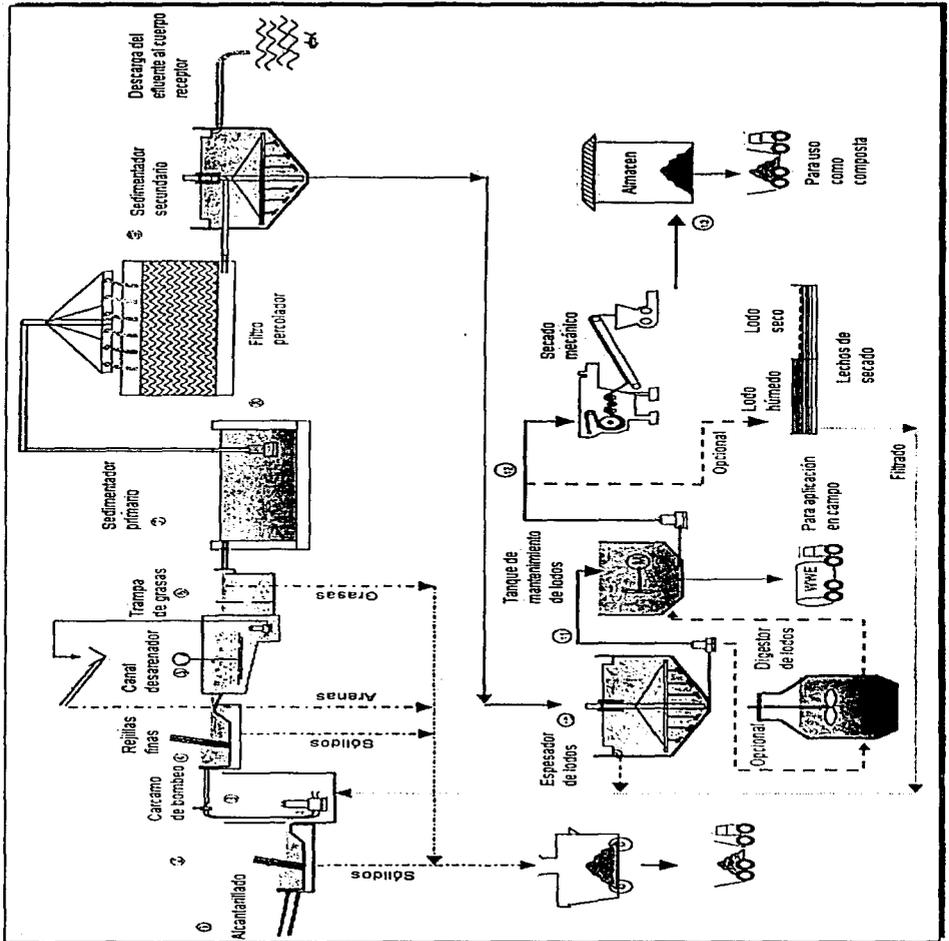


Figura 53 Tren de tratamiento típico para filtro percolador mostrando estructuras adyacentes.

V.5.2 Topografía

Los filtros biológicos son un proceso de tratamiento en el que las características del terreno juegan un papel muy importante, tal es el caso de la topografía, ya que la carga hidráulica disponible se pierde completamente en el filtro, por lo que si no se dispone de un terreno con suficiente pendiente se tendrá que recurrir al uso de bombeos intermedios.

Para terrenos con suficiente pendiente, la aplicación de filtros biológicos resulta muy económica en comparación con procesos de tratamiento equivalentes, ya que no se requiere de dispositivos mecánicos para llevar a cabo la aireación del agua, sin embargo, es necesario evaluar cuidadosamente esta situación, considerando el tipo de terreno, ya que si está constituido por material duro, los costos de construcción pueden elevarse demasiado, ya que sería necesario construir terrazas para desplantar las estructuras.

La ubicación de cada una de las estructuras que constituyen la planta de tratamiento, deberá ser el resultado de un análisis detallado en cuanto a movimientos de tierra, de acuerdo a las características específicas del terreno, así como a las necesidades hidráulicas, para que la planta trabaje preferentemente con un flujo hidráulico por gravedad.

De acuerdo a los tipos de terreno y de desplantes de estructuras, las variantes que son posibles distinguir son (figura 54):

- a) Estructuras enterradas completamente
- b) Estructuras semienterradas
- c) Planta con flujo por gravedad.
- d) Planta con bombeos intermedios.

De fundamental importancia resulta para el proyecto, la topografía del predio en donde será construida la planta de tratamiento, ya que con dicha información el responsable del mismo podrá llevar a cabo una distribución adecuada de los procesos, minimizando los movimientos de tierra requeridos, así como las longitudes de tubería y las piezas especiales para las interconexiones.



Figura 54 Aspectos constructivos de instalaciones adyacentes a los filtros percoladores.

En forma específica, la aplicación del proceso de tratamiento en base a filtros percoladores, encuentra muchas ventajas si se dispone de un terreno con pendiente, debido a que es posible absorber con la misma, la pérdida de carga en el filtro, evitando tener que recurrir a bombeos intermedios o a enterrar completamente los procesos posteriores al filtro para poder seguir trabajando por gravedad en la mayor medida de lo posible. Además, de considerarse los extras por la construcción de terraplenes para elevar estructuras, excavaciones necesarias y uso de bombeo, en caso necesario.

En un terreno con pendiente, entre mayor sea esta, se reducirá la extensión requerida de terreno y se eliminarán los bombeos intermedios, sin embargo, se debe evaluar detenidamente los requerimientos de cortes para asentar las estructuras, sobre todo cuando la selección de dicho terreno con una pendiente elevada implique trabajar en suelos duros.

Evidentemente, dada la enorme variedad de opciones topográficas, este es el factor que

demandará mayor ajuste, e incidirá en mayor grado en la elaboración de un presupuesto detallado de la obra. Dada la imposibilidad de poder cubrir todas las opciones que se pueden presentar, tanto en el desnivel topográfico, como en su configuración, ya que no siempre es uniforme, en relación a este aspecto podrán considerar tres casos:

- a) Terrenos planos ($0\% < m < 5\%$)
- b) Terrenos de pendiente media ($5\% < m < 15\%$)
- c) Terrenos de alta pendiente ($m > 15\%$)

Para los casos de terrenos con pendiente, se considerará esta como uniforme, y se deberá ajustar la distribución relativa de las unidades o procesos entre sí, de acuerdo a las características topográficas del terreno de que se disponga. Las diferentes condiciones de pendientes se verán reflejadas posteriormente en los perfiles hidráulicos de las diferentes opciones de la planta.

V.5.3 Tipo de Suelo

En la naturaleza, los suelos se encuentran generalmente en forma de mezclas con proporciones variables de grava, limo, arcilla, arena o materia orgánica. La clasificación de los suelos se basa precisamente en el reconocimiento del tipo y predominio de sus constituyentes, considerando además los tamaños de grano y la graduación, así como sus propiedades de plasticidad y comprensibilidad.

De gran utilidad resulta para la clasificación de los suelos el empleo del "Sistema Unificado de Clasificación de Suelos" y el "Triángulo de identificación" correspondiente. Es indispensable señalar que hay características importantes de los suelos que no pueden designarse en forma satisfactoria por símbolos, por lo que es necesario, hacer uso de una descripción adicional. Esto es particularmente importante para suelos que se pretenden utilizar como cimiento para estructuras. En estos casos, las condiciones naturales del suelo, tales como: densidad aparente, estructura y características de drenaje, tienen la misma importancia que la clasificación de sus constituyentes.

De acuerdo al propósito al que se destine, el estudio de suelos se divide en dos categorías:

- a) Materiales para la construcción de terraplenes o rellenos procedentes de bancos de préstamo.
- b) Cimentaciones para estructuras.

Los suelos que son fuentes potenciales de materiales para construcción de terraplenes, deben describirse adecuadamente en el registro del pozo o perforación efectuada con el propósito de explorar el terreno. Como estos materiales van a ser alterados por excavación, transporte y compactación en un relleno, su estructura es de menor importancia que las características y cantidades de los constituyentes del suelo. Es importante anotar las condiciones naturales de humedad ya que, materiales muy secos en los bancos de préstamo, requieren la adición de grandes cantidades de agua para obtener buena compactación y, suelos muy húmedos que contengan apreciables cantidades de finos, pueden requerir ser sometidos a costosos procesos para ser usados.

Respecto a los suelos que serán utilizados como cimentación para estructuras, es de gran importancia determinar: su estructura natural, su compactación y su contenido de humedad. El estado natural de un suelo de cimentación es importante, ya que la capacidad de carga y asentamiento bajo carga varían grandemente con la consistencia o compactación del mismo.

V.5.4 Especificaciones de construcción, equipamiento y montaje.

Es importante y de carácter reglamentario cumplir con la normatividad correspondiente a la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales, ya que aparte del cumplimiento legal, esto llevará a beneficios operativos y económicos durante la vida útil de la misma. Algunos de los conceptos de mayor interés en este aspecto, son los siguientes (figura 55):

- a) Desmontes
- b) Excavaciones

-
- c) Plantillas
 - d) Rellenos
 - e) Materiales para rellenos
 - f) Preparación del terreno para rellenos
 - g) Acero de refuerzo
 - h) Cimbra de madera y obra falsa
 - i) Diseño
 - j) Preparaciones y descimbrado
 - k) Separadores de cimbra y pernos
 - l) Tipos de acabado
 - m) Concretos
 - n) Materiales (cemento, agua, agregados en general)
 - o) Calidades de concreto
 - p) Dosificación y proporcionamiento
 - q) Pruebas de control
 - r) Colocación del concreto
 - s) Curado y protección
 - t) Resanado
 - u) Mortero en bases de columnas
 - v) Materiales de expansión



Figura 55 Aspecto del tipo de acabado de un filtro percolador.

V.5.5 Especificaciones de equipamiento y montaje.

En cuanto a equipos y montajes, se consideran los siguientes conceptos:

- a) Cribas metálicas
- b) Bombas para aguas crudas
- c) Mecanismo de rastras y desnatado para sedimentadores
- d) Mecanismo de alimentación de agua al filtro biológico
- e) Aireador
- f) Sistema de dosificación de cloro
- g) Mecanismo de rastras para espesador
- h) Válvulas y compuertas
- i) Tuberías y piezas especiales
- j) Soldadura
- k) Pintura

V.6 Operación y mantenimiento del filtro percolador.**V.6.1 Manual de operación y mantenimiento****V.6.1.1 Responsabilidades del operador.**

- a) Mantener en una forma eficiente y adecuada la operación y el mantenimiento de la planta y sus instalaciones periféricas.
- b) Mantener registros y datos estadísticos de la operación, mantenimiento y administración de la planta de tratamiento.
- c) Desarrollar, en base a las necesidades de la planta, los requerimientos de personal, descripción de puestos y asignación de trabajo.
- d) Desarrollar y ejercer, adecuadamente, los presupuestos financieros para la operación y mantenimiento de la planta de tratamiento.
- e) Proporcionar al personal de operación y mantenimiento un ambiente seguro de trabajo, con herramientas y equipos adecuados.
- f) Analizar la información operacional de la planta de tratamiento para determinar cambios y mejoras de las instalaciones y lograr, una mayor eficiencia en el tratamiento.
- g) Asegurarse que el personal de reciente contratación le sea proporcionada la inducción y entrenamiento requeridos para familiarizarse al sistema de tratamiento.
- h) Establecer un programa de capacitación y adiestramiento para todo el personal de operación y mantenimiento.

-
- i) Establecer parámetros de costos del sistema de tratamiento para abatir al máximo los gastos no requeridos en operación, materiales y mantenimiento.
 - j) Desarrollar un sistema de primeros auxilios y de seguridad e higiene en el trabajo adicionando registros y análisis estadísticos.
 - k) Mantener una continua comunicación con el personal de operación para detectar fallas y establecer medidas correctivas para los equipos.
 - l) Preparar planes para necesidades futuras

V.6.2 Prearranque, arranque y operación normal.

V.6.2.1 Prearranque.

Antes de introducir el agua a la planta de tratamiento, deberán revisarse con cuidado los siguientes aspectos:

- a) Condiciones de la obra civil en lo referente a existencia de grietas, situaciones de impermeabilizaciones, aplicación de pintura en estructuras, etc.
- b) Condiciones de anclajes de equipos, vertedores y mamparas.
- c) Nivelación de vertedores, rastras y brazos distribuidores del filtro.
- d) Operación en general de motores, mecanismos de rastras, desnatadores y válvulas.
- e) En lo posible, el operador deberá estar presente cuando el equipo sea instalado, a fin de familiarizarse con los diferentes equipos y detalles de la planta.

- f) Deberá de verificarse el tipo de aceite empleado en los equipos, siendo conveniente, para lo futuro, anotar la cantidad y tipo de aceite requerido.
- g) En el caso de los brazos distribuidores, una vez que el aceite ha sido instalado, revisar su ajuste y nivelación, rotando la unidad con la mano y observando si esto es suave, cualquier vibración o aspereza deberá ser corregida antes de poner la unidad en servicio.
- h) Respecto a las válvulas, una vez aplicado lubricante en su mecanismo, estas deberán tener desplazamiento suave y sin brincos. Igualmente es importante revisar la respuesta de cada uno de los equipos a su accionamiento en el tablero de control.

V.6.2.2 Arranque

Una vez verificada la obra civil y el equipo electromecánico, se empezará a introducir el agua residual a la planta, debiéndose observar el comportamiento de los mecanismos de cada proceso en condiciones de operación normal con respecto al nivel de agua.

Respecto al filtro biológico, observar cuidadosamente la rotación de los brazos, la suavidad y velocidad de giro y la distribución del agua sobre el medio.

Pasarán varios días antes de que inicie el crecimiento de microorganismos en el medio soporte y, de hecho, varias semanas antes de que exista una población adecuada. Las condiciones ambientales y las características de las aguas residuales son los principales factores que afectan el crecimiento de los microorganismos. Durante este período se producirá un efluente inestable en su calidad.

V.6.2.3 Operación normal

Una vez que los microorganismos se han desarrollado, y su crecimiento se ha estabilizado, la operación del sistema es una rutina muy simple, consistente básicamente, en observaciones

acerca de la presencia de moscas, olores, orificios taponados, existencia de vibraciones en los brazos alimentadores.

El proceso de filtros percoladores requiere mucho menos monitoreo y control que otros procesos, sin embargo, es requerido un apropiado control y operación para alcanzar el funcionamiento deseado y evitar problemas operacionales, tales como producción de olores, moscas, taponamientos, etc.

El funcionamiento del filtro percolador es afectado por factores tales como: cargas hidráulica y orgánica, profundidad y características físicas del medio, método de distribución del agua residual, ventilación, características del agua residual y carga hidráulica sobre la unidad de sedimentación.

Esto último es muy importante, ya que si la carga hidráulica es muy baja se podrán desarrollar condiciones sépticas en el sedimentador, mientras que cargas excesivamente altas arrastrarán los sólidos fuera del mismo.

V.6.2.4 Paro de la planta.

En el paro de la planta, ya sea para corregir algún desperfecto o para darle servicio a alguna parte del equipo, es necesario que el operador considere lo siguiente:

- a) Inspeccionar la planta para asegurarse que no existen anomalías que interfieran en los trabajos a realizar.
- b) Analizar la posibilidad de sacar de operación solamente alguna parte del proceso de tratamiento para no derivar (by pass) por completo el flujo total de la planta.
- c) Evaluar las posibles afectaciones a los demás procesos por la ejecución del paro parcial.

Para el caso de paro del filtro biológico, considerar lo siguiente:

-
- d) Disminuir gradualmente el flujo de agua al filtro biológico.
 - e) Abrir las puertas de los brazos distribuidores para desalojar toda el agua que contienen.
 - f) Nunca hacer palanca hacia el medio filtrante, ya que se puede dañar el sistema.
 - g) Nunca tratar de parar la rotación del distribuidor con las manos
 - h) Revisar que las estructuras ligadas al filtro tales como: sedimentador primario, sedimentador secundario y cárcamo de alimentación, permanezcan con sus tirantes normales de agua.

En caso de paro prolongado considerar adicionalmente lo siguiente:

- a) Cerrar el bajo dren del filtro para prevenir que entre el agua de otras unidades
- b) Drenar o bombear el agua que quede en el canal colector en la galería del bajo dren para evitar problemas.
- c) Desagüar los brazos del distribuidor, los canales de recolección y ductos de ventilación.
- d) Quitar cualquier escombros que se encuentre en el canal de recolección e inspeccionar los bajos drenes, retirando cualquier basura que pueda taparlos.
- e) Revisar el nivel de aceite en el distribuidor y llenar si es necesario.
- f) Inspeccionar los empaques.
- g) Si el crecimiento de la masa biológica es excesivo, remover el sobrante ya que este puede causar taponamiento cuando el filtro vuelva a ser puesto en marcha.

V.6.3 Control del proceso.

El operador de la planta tendrá como responsabilidad fundamental obtener las mayores eficiencias de tratamiento con los costos más bajos posibles. Para el control del proceso el operado debe establecer un programa de monitoreo sistemático, cuyos resultados permitirán evaluar los parámetros de carga hidráulica y superficial, los cuales sirvieron para dimensionar el proceso y cuya violación repercutirá en la eficiencia esperada.

V.6.3.1 Monitoreo.

El monitoreo continuo implica la toma de muestras periódicas en varios puntos del proceso, con el fin de verificar el buen funcionamiento de cada una de las operaciones unitarias involucradas en el tratamiento. Igualmente el monitoreo servirá para vigilar el comportamiento del proceso, proporcionando las herramientas necesarias para llevar a cabo las correcciones requeridas en la operación rutinaria.

El programa de monitoreo deberá efectuarse de forma cuantitativa, sistemática y funcional debido a que sus resultados servirán para tomar decisiones en cuanto a la política operacional del sistema de tratamiento. Adicionalmente, el programa de monitoreo deberá incluir la medición del gasto del influente, efluente y los parámetros más representativos que indiquen la eficiencia lograda en el tratamiento de las aguas residuales desde su entrada hasta la salida.

Para poder obtener el mayor grado de confiabilidad de los resultados del monitoreo, es necesario que la toma y preservación de las muestras se realicen en apego a las técnicas apropiadas y autorizadas.

Para la obra de toma y la planta de tratamiento, se proponen los siguientes puntos de monitoreo:

- a) Obra de toma
- b) Canales Parshall

-
- c) Caja distribuidora en el caso que esta exista
 - d) Efluente de filtros biológicos
 - e) Efluente de clarificadores secundarios
 - f) Efluente clorado

V.6.3.2 Operación.

La operación de las estructuras incluidas en la obra de toma y el pretratamiento deberá ser cuidadosamente vigilada. Se deberá mantener vigilancia en la limpieza de las rejas. Igualmente se revisará periódicamente el nivel de acumulación de arenas en el desarenador.

Se revisará con frecuencia el canal Parshall para detectar taponamientos. Respecto a las válvulas, para este equipo se tomará en cuenta lo siguiente:

- a) Verificar el movimiento de la compuerta.
- b) Verificar que las compuertas estén perfectamente aseguradas.
- c) Usar las compuertas accionando suavemente el volante.
- d) Extraer los sólidos grandes que puedan bloquear las compuertas.

En bombas es recomendable que el operador considere lo siguiente:

- a) Vigilar la operación el indicador del nivel en el pozo húmedo.
- b) Desalojar los sólidos que se encuentran dentro del pozo húmedo.
- c) Verificar que no existan fugas de agua en las bombas.
- d) Verificar que no se presenten ruidos fuera de los normales en el funcionamiento de las

bombas y motores.

- e) Al hacer limpieza general, drenar el pozo húmedo, utilizando una bomba de achique sumergible.
- f) Verificar que las conexiones eléctricas estén en perfecto estado.
- g) Verificar que los motores estén en perfecto estado.

Caja distribuidora, en el caso de que esta exista:

Para que cumpla adecuadamente su función, el operador deberá observar que el flujo sea normal.

Clarificadores primarios y secundarios. El clarificador primario recibe las aguas residuales crudas eliminando los sólidos primarios y el secundario recibe el efluente de los filtros biológicos.

Los principales equipos y partes que operan en los clarificadores tanto primarios como secundarios son los siguientes:

Mecanismo central, mecanismo de transmisión, alarma de sobrecarga, unidad de movimiento, puente y barandal, columna central, jaula central giratoria, pozo de alimentación, brazos rotatorios, mecanismo desnatador, vertedor de efluente, mampara de natas, caja de natas, tolva de lodos. El operador deberá seguir las instrucciones para cada elemento del equipo empleado en los clarificadores.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Conclusiones.

Durante el desarrollo de este trabajo, se establecieron las siguientes conclusiones:

Como consecuencia del incremento en la indisponibilidad de agua con las características y condiciones necesarias para su fácil y económico aprovechamiento, así como por la exigencia ambiental en cuanto a su protección, el tratamiento de aguas residuales se convierte en una necesidad cada vez más imperante, sin embargo, el entendimiento y difusión de esta actividad no ha sido la suficiente.

Debido a la situación económica y por ende la situación social del país, que provoca una priorización de necesidades y sus correspondientes soluciones, las acciones para el tratamiento de aguas residuales se han visto mermadas, ya que los recursos económicos y humanos son enfocados en su mayoría en otras actividades.

Por los diversos usos a los que es sometida el agua y a la facilidad de agregarles elementos ajenos a su composición original, resulta muy difícil el proporcionar con esa misma sencillez y rapidez un tratamiento al agua para devolverla a sus condiciones originales.

El uso de técnicas y procedimientos adecuados para el muestreo, transporte, y análisis del agua, es de gran importancia para una adecuada caracterización y control de los parámetros en el tratamiento de las aguas residuales.

En consecuencia a la existencia de una normatividad relativa al reuso, nivel de tratamiento, y características del agua residual para su disposición final, se ha logrado aminorar la constante contaminación al medio ambiente, sin embargo, esta normatividad resultará insuficiente para las características y condiciones cambiantes del medio en donde se disponen dichas aguas.

El tratamiento de aguas residuales, no ha tenido un objetivo económico atractivo salvo en

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

casos especiales, debido a la falta de comercialización por escasez de aplicaciones del agua de reuso, y a las grandes inversiones con recuperaciones a mediano y largo plazo que implica el diseño, la construcción y la operación de las plantas de tratamiento de agua residual.

La investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías en nuestro país para el tratamiento de aguas residuales con filtros biológicos, es escasa, existiendo la mayoría de éstos en universidades públicas y en dependencias descentralizadas como el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA.

Al no existir una cobertura suficiente del sistema de alcantarillado o incluso a la inexistencia de tal, el desalojo de las aguas residuales crea cuerpos de agua residual expuestos al medio ambiente, los cuales provocan enfermedades en los seres humanos que mantienen algún tipo de relación con dichos cuerpos, requiriendo posteriormente de servicios médicos y obteniendo como consecuencia una disminución en el bienestar social y en la productividad de sus actividades.

El entendimiento de los métodos de tratamiento secundario, han requerido de análisis profundos y diversos, lo que ha llevado al desarrollo de diversos sistemas para lograr el mismo objetivo.

El conocimiento del metabolismo de las bacterias involucradas en el tratamiento de aguas residuales, ha provocado que los sistemas desarrollados para el tratamiento de aguas residuales cumplan con su objetivo, aunque no todas las condiciones ambientales y físicas involucradas en el proceso, han sido consideradas completamente.

En el caso específico de los filtros percoladores, aún con todas sus variantes en cuanto al tipo de medio de empaque y sistema de distribución, conservan los mismos principios de operación.

En el inicio del estudio y desarrollo de un sistema de tratamiento de aguas residuales, se observó la manera en que la naturaleza llevaba a cabo esto, lo que originó en un principio, que los primeros filtros percoladores tuvieran un medio de empaque mineral o rocoso. Con el desarrollo de nuevos y mejores materiales, la inclusión de medios sintéticos logró el aumento en la eficiencia de

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

los filtros percoladores, lo que derivó en la posibilidad de dar tratamiento a un mayor gasto, con el mismo volumen del medio de empaque.

Se siguen empleando los métodos desarrollados a mediados del siglo anterior, cuando hoy en día los medios de empaque sintéticos corresponden a desarrollos de tecnología reciente.

Dentro del sistema de tratamiento de aguas residuales por medio de filtros percoladores, se han buscado soluciones para incrementar la eficiencia del tratamiento por medio de arreglos entre ellos y por la implantación de la recirculación de sus efluentes.

Las características tan variadas de las aguas residuales a tratar, impiden su tratamiento con un alto grado de eficiencia logrado por un solo método, provocando que por lo general los sistemas de tratamiento sean usados en combinación entre ellos.

Los métodos desarrollados para la modelación matemática del funcionamiento de los filtros percoladores, se han debido a métodos empíricos desarrollados por observación y experiencia sobre los mismos, y simplificando por mucho todas las variables que están involucradas en el proceso, por lo que no existe ningún método que prediga su funcionamiento de manera matemática.

Los tres métodos empíricos presentados en este trabajo, corresponden a los métodos más utilizados para el diseño de filtros percoladores.

El método de diseño de la NRC resulta muy simple, ya que no requiere de determinación de variables ajenas a las obtenidas en campo y en laboratorio por la caracterización del agua residual a tratar.

El método desarrollado por Eckenfelder, constituye el método más adecuado de los presentados, ya que toma en cuenta las características de tratabilidad del agua y las del medio de empaque, asegurando con esto, un diseño más certero al desempeño mostrado por el filtro percolador.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para el caso específico de México, las fórmulas del método de diseño de la CNA, son las desarrolladas por Eckenfelder, en donde la CNA propone un rango de valores para la variable K y tablas para la selección del valor de la variable n, por lo que para el caso del diseño de filtros percoladores de forma práctica, su utilización resulta muy recomendable.

La determinación en laboratorio de las variables n y K del método de diseño por las ecuaciones de Eckenfelder, constituyen una opción recomendable para la verificación del diseño de filtros percoladores, ya que estas variables son determinadas bajo condiciones similares a las que operará el filtro, asegurando un desempeño muy similar a su modelo matemático.

Analizando los resultados del ejemplo de aplicación de los métodos antes descritos, se observa que arrojan resultados similares de manera general, lo que indica que tienen un buen grado de predicción matemática para la operación del filtro percolador, sin embargo el método de Eckenfelder, sobresale de los demás ya que demuestra un valor medio en sus resultados y toma en consideración las características del agua y del medio de empaque.

Es importante conocer el funcionamiento de los brazos distribuidores, ya que en parte, de ellos depende que el desempeño del filtro percolador sea lo más eficiente posible, al distribuir de manera homogénea el agua residual en toda la superficie del medio. Además, su buen funcionamiento del sistema de distribución, depende de una buena operación y mantenimiento del mismo.

En cuanto al terreno en donde se ubicarán los filtros percoladores, es recomendable que se aproveche su pendiente natural, para que de esta forma, el flujo del agua residual sea provocado por la acción de la fuerza de gravedad y evitar en la medida de lo posible el uso de bombeo.

Es importante construir y fabricar las estructuras y elementos de un sistema de filtros percoladores, con referencia en normas y especificaciones correspondientes, asegurando con esto el menor número de reparaciones y paros del sistema de tratamiento durante su vida útil.

Los operadores de las plantas tratadoras deben estar capacitados para responder rápida y

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

efectivamente a los problemas que se presenten durante la operación y el mantenimiento del sistema, asegurando con esto una mayor rentabilidad del sistema de tratamiento.

Es indispensable el monitoreo del sistema mediante un control de los procesos en toda la planta de tratamiento, asegurando que los procesos responderán rápidamente a cambios en las características del agua afluente o en el gasto que ingresa a la planta.

Recomendaciones.

Las recomendaciones que se generan de la realización de este trabajo son:

Promover desde la educación básica, una conciencia en materia ambiental, procurando su enfoque en la enseñanza de la preservación del agua y la adecuada disposición de la misma una vez usada.

En las pequeñas comunidades, promover el uso de sistemas sencillos de tratamiento de aguas residuales, como fosas sépticas, filtros de arena, y zanjas de oxidación antes de que estas aguas sean dispuestas.

En materia legal, revisar constantemente los apartados referentes al muestreo y los límites de contaminantes para la disposición de aguas residuales.

Promover fiscalmente el reuso y utilización de agua residual tratada en la industria o actividades productivas, así como la implantación de plantas de tratamiento en las comunidades mayores de 10000 habitantes, con la finalidad de disminuir la contaminación de los cuerpos de agua de alta disponibilidad.

En el sector salud, establecer con mayor frecuencia campañas de concientización sobre la importancia del cuidado del agua en la salud humana.

Adecuar los diversos métodos de tratamiento secundario a las condiciones y capacidades

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

técnicas y económicas del país.

Realizar investigación referente al proceso de biodegradación de la materia orgánica, para obtener parámetros de tratabilidad del agua residual, correspondientes a las condiciones ambientales y características del sitio en donde se opere la planta de tratamiento.

Fomentar el intercambio de información entre dependencias y público en general, para la utilización y aprovechamiento de la experiencia recopilada.

Desarrollar proveedores nacionales de los diversos elementos que conforman un sistema de tratamiento de aguas residuales por filtros biológicos.

Referente a los criterios de diseño de filtros percoladores, se recomienda el uso del método de desarrollado por Eckenfelder o en segundo caso el de la CNA, ya que demostraron ser los métodos más completos en cuanto a la consideración de variables que intervienen en el proceso del tratamiento de las aguas residuales.

De manera preferente, localizar la planta de tratamiento en donde la pendiente del terreno provoque la disminución de bombeo dentro de la planta, asegurando con esto una disminución en los costos de operación y mantenimiento.

Asegurar un control de calidad en los procesos de construcción de la planta de tratamiento, para aumentar la vida útil del sistema y aumentar su rentabilidad.

Capacitar continuamente a los operadores de la planta, con el objeto de que éstos reaccionen adecuadamente ante cualquier circunstancia que se de en la operación del sistema de tratamiento.

Establecer programas de acciones de revisión, preventivas y correctivas, para asegurar el buen funcionamiento de cada uno de los componentes del sistema.

Elaborar manuales de operación y mantenimiento de cada uno de los equipos y sistemas

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

de la planta de tratamiento.

Elaborar registros de acciones aplicadas a cada elemento del sistema, para su posterior referencia.

Instruir al personal continuamente sobre aspectos de seguridad en la operación y estancia en las instalaciones de la planta de tratamiento.

Coordinar y establecer acciones que generen una disminución en los gastos de operación de la planta, como acciones de ahorro de combustibles y de energía eléctrica.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- ASCE, AWWA, water treatment plant design, 2nd Edition, Ed. Mc Graw Hill, 1990.
- A.S. FOUST, L.A. WENZEL, Principios de operaciones unitarias, 2nd Edition, 1987.
- BILL T. RAY, Environmental engineering, Ed. Plus, 1995.
- COMISION NACIONAL DEL AGUA, Sistemas alternativos de tratamiento de aguas residuales y lodos producidos libro II 3.2.2, Gerencia de normas técnicas, 1994.
- D. BARNES, Water and wastewater engineering systems. Ed. Pitman, 1981.
- E.W. STEEL, T.J. MCGHEE, Water supply and sewerage, 5th Edition, Ed. Mc Graw Hill, 1979.
- FAIR GORDON, GEYER JOHN, OKUN DANIEL, Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales, tomo 2 Ingeniería sanitaria y de aguas residuales, 13a reimpresión, Ed. Limusa, 1997.
- JAMES M. MONTGOMERY, Water treatment principles and design, Ed. John Wiley & Sons, 1985.
- J. B. WHITE, Wastewater engineering, 3th Edition, Ed. Eduard Arnold, 1987.
- MARK J. HAMMER, Water and wastewater technology, Si versión, Ed. John Wiley & Sons, 1986.
- METCALF & EDDY, Treatment engineering: Treatment, disposal & reuse, Ed Mc Graw – Hill, 1989.
- RONALD L. DROSTE, Theory and practice of water and wastewater treatment, Ed. John Wiley & Sons, 1997.
- R. S. RAMALHO, Introduction to wastewater treatment processes, 2nd Edition, Ed. Academia Press, 1983.
- ROBERT L. SANKS, Water treatment plant design for practicing engineer, Ed. Butterworth – Heinemann, 1978.
- SEDUE, Manual de operación y mantenimiento de filtros percoladores, 1996.
- T.J.CASEY, Unit treatment processes in water and wastewater engineering, Ed. John Wiley & Sons, 1997.
- T.H.Y. TEBBUTT, Fundamentos de control de calidad del agua, 1st Edition, Ed. Noriega, 1990.
- TOM D. REYNOLDS, PUAL A. RICHARDS, Unit operations and processes in environmental engineering, 2nd Edition, Ed. Pws Publishing Company, 1995.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION, ASCE, Manual on Engineering Practice No. 36, Wastewater treatment plant design, 3th Edition, 1991.

ANEXOS

ANEXOS

ANEXOS

Anexo A Inventario nacional de plantas de tratamiento con sistema biológico al mes de Diciembre de 2000.

Inventario Nacional De Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales Municipales Con Sistemas De Tratamiento Biológico, diciembre 2000.

Comisión Nacional Del Agua.

<i>Localidad</i>	<i>Planta</i>	<i>Proceso</i>	<i>Capacidad instalada (l/s)</i>	<i>Gasto de Oper. (l/s)</i>	<i>Cuerpo receptor o reuso</i>	<i>Observaciones</i>
Tecate, Baja California	Tecate	Filtros biológicos	200.0	138.0	Arroyo Tecate	Cuenta con diagnostico para rehabilitación
Tijuana, Baja California	Ecoparque	Filtros biológicos	5.0	5.0	Riego de áreas verdes	Operada por el colegio de la frontera norte
Carmen, Campeche	Centro Readaptación Social	Biológico	5.0	0.2	Pantano	
San Lucas, Chiapas	San Lucas	Biológico	30.0	0.0	Arroyo Seco	Fuera de operación
Copoya, Chiapas	Copoya	Filtros biológicos	10.0	0.0	Río Grijalva	No llega el agua, porque no tienen a.p.

ANEXOS

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas	Tuxtla Gutiérrez	Filtros biológicos	400.0	0.0	Río Sabinal	Existe proy. Rehabilitación y ampliación.
Cuatrocienegas, Coahuila	Cuatrocienegas	Filtros biológicos	12.5	0.0	Infiltración superficial	Fuera de operación
Parras, Coahuila	Parras	Filtros biológicos	50.0	0.0	Riego Agrícola	Fuera de operación
Coyutlan, Colima	Coyutlan	Filtros biológicos	10.0	2.0	Ac .Barra De Cuyutlán	
Manzanillo, Colima	Salahua	Filtros biológicos	260.0	290.0	Lag. V. De Las Garzas	Sobrecargada
Irapuato, Guanajuato	Frac. Tancoyol	Biológico	6.0	6.0	Río Guanajuato	
Mascota, Jalisco	Mascota	Filtros biológicos	15.4	15.4	Río Mascota	Requiere rehabilitación y ampliación
Tala, Jalisco		Filtros biológicos	40.0	40.0	Arroyo Zarco	
Tepatitlan, Jalisco	Tepatitlan	Filtros biológicos	200.0	160.0	Río Tepatitlan	
Nextipac, Jalisco	Nextipac	Biológico	2.5	2.5	Río Blanco	

ANEXOS

Venta Del Astillero, Jalisco	Venta Del Astillero	Biológico	6.5	6.5	Arroyo El Saltillo	
Capulhuac, México	Capulhuac	Filtros biológicos	50.0	50.0		
Cuatitlán Izcalli, México	Ford Motor Company	Biológico	30.0	30.0	Uso industrial	Agua mpal. Tratada para uso en la industria
Ixtapan De La Sal, México	Ixtapan de la sal	Biológico	12.0	0.0	Río Salado	Fuera de operación
Villas De San José, México	Villas De San José	Filtros biológicos	50.0	0.0		Fuera de operación
Cuatlla, Morelos	Cuatlla	Filtros biológicos	420.0	520.0	Río Cuatlla	Sobrecargada
Cuatlla, Morelos	Uh Piedra Blanca	Filtros biológicos	7.0	0.0		Fuera de operación, requiere rehabilitación
Jiutepec, Morelos	Las Moras I	Filtros biológicos	13.0	13.0		
Jiutepec,	Las Moras II	Filtros	13.0	13.0		

ANEXOS

Morelos		biológicos				
Uh El Paraje, Morelos	Uh El Paraje	Filtros biológicos	27.0	4.0		Requiere rehabilitación
Uzeta, Nayarit	Uzeta	Biológico	7.0	1.2	Zanjon	Requiere rehabilitación
Barranca Del Oro, Nayarit	Barranca Del Oro	Biológico	8.0	0.5	Arroyo	
El Pilón, Nayarit	El Pilón	Biológico	3.0	3.0	Zanjon	
Bucerías, Nayarit	Bucerías	Filtros biológicos	30.0	28.0	A. Torrencial	Requiere rehabilitación
El Coatante, Nayarit	El Coatante	Biológico	3.0	5.5	Arroyo	Sobrecargada
Compostela, Nayarit	Compostela	Biológico	37.0	22.0	Río	
Ixtapa De La Concepción, Nayarit	Ixtapa De La Concepción	Biológico	6.0	0.0	Arroyo	Fuera de operación, requiere rehabilitación
Rincón Guayabitos, Nayarit	Rincón Guayabitos	Biológico	60.0	7.0	Arroyo	Requiere rehabilitación

ANEXOS

Santa María Del Oro, Nayarit	Santa María Del Oro	Biológico	8.0	4.5	Arroyo	Requiere rehabilitación
Huajuapán de León, Oaxaca	Huajuapán de León	Filtros biológicos	150.0	75.0	Río Mixteco	
Acatlán, Puebla	Acatlán	Filtros biológicos	40.0	25.0		
Huejotzingo, Puebla	Huejotzingo	Filtros biológicos	60.0	40.0	Dren Agrícola	
San Martín Texmelucan, Puebla	San Martín Texmelucan	Filtros biológicos	190.0	140.0	Dren Agrícola	
Tepeaca, Puebla	Tepeaca	Filtros biológicos	120.0	60.0	Dren agrícola	
Mesa de León, Querétaro	Mesa de León	Filtros biológicos	5.0	3.0	Arroyo	
Querétaro	Planta Sur	Filtros biológicos	500.0	350.0	Riego Agrícola	
San Juan Del Río, Querétaro	San Juan Del Río	Filtros biológicos	125.0	125.0		

ANEXOS

Cd. Paraíso, Tabasco	Cd. Paraíso	Filtros biológicos	75.0	0.0	Río Seco	Fuera de operación
Apizaco, Tlaxcala	Apizaco "B"	Filtros biológicos	180.0	100.0	Río Zahuapan	
U.H. Valente Díaz, Veracruz	U.H. Valente Díaz	Filtros biológicos	7.0	5.9	Laguna Natural	
Veracruz	Playa Norte	Filtros biológicos	1,000.0	0.0	Mar	Se encuentra en rehabilitación
Veracruz	U.H. Las Hortalizas	Filtros Biológicos	15.0	10.0	Río Medio	
Veracruz	U.H. Río Medio	Filtros Biológicos	120.0	41.4	Río Medio	

ANEXOS

Anexo B Normatividad.

El tratamiento de las aguas residuales es un aspecto fundamental para conservar el recurso y evita la degradación de los cuerpos receptores de aguas nacionales. Para su ordenamiento y control se tienen diferentes disposiciones legales que conjuntamente con lo dispuesto en la Ley de Aguas Nacionales y su reglamento, así como la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua ayudan a la preservación del entorno ecológico. La normatividad vigente al respecto corresponde a:

En lo particular:

- NOM-001-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales vertidas en aguas y bienes nacionales, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 1997.

Esta norma establece las fechas en que deberán cumplir los responsables de las descargas municipales e industriales a los cuerpos receptores, de acuerdo al tamaño de la localidad y en base a la población que se registró en el XI Censo General de Población y Vivienda de 1990.

- NOM-002-ECOL-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de junio de 1998.
- NOM-003-ECOL-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 21 de septiembre de 1998.
- Durante el año 2000 se generó un proyecto de norma que se identificó como NOM-004-ECOL-1999, que establecerá las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes para los lodos provenientes de desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de agua residuales, con el fin de

ANEXOS

posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger el ambiente y la salud humana.

En lo general:

- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, artículo 27, párrafo quinto, así como el artículo 115, modificado en el año de 1987.
- Ley de Aguas Nacionales, promulgada en diciembre de 1992.- Es una ley reglamentaria del artículo 27 constitucional en materia de aguas nacionales.
- Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, publicado en el Diario Oficial de la Federación el día 12 de enero de 1994.
- Ley Orgánica de la Administración Pública Federal.
- Decreto por el que se crea la Comisión Nacional del Agua, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 16 de enero de 1989.
- Ley Federal de Derechos, promulgada en 1982.
- Ley de Ingresos de la Federación.
- Ley de Contribución de Mejoras por Obras Públicas Federales de Infraestructura Hidráulica, vigente a partir de 1991.
- Leyes estatales en materia de agua potable y alcantarillado, promulgadas de 1969 a 1994 en las 31 entidades federativas y en el Distrito Federal.
- Ley General de Bienes Nacionales, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de enero de 1982.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, promulgada en 1987.

ANEXOS

- Tratado sobre la Distribución de Aguas Internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América, celebrado el 3 de febrero de 1944 y publicado en el Diario Oficial de la Federación el 30 de marzo de 1946.
- Decreto presidencial de creación del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) del 7 de agosto de 1986.