

15
205



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

Escuela Nacional de Estudios Profesionales
"ZARAGOZA"

**ESTUDIO COMPARATIVO DE PROCESOS DE TRATAMIENTO
DE EFLUENTES PARA LA ELIMINACION DE SOLIDOS
ORGANICOS DISUELTOS, MEDIANTE UN
ANALISIS GRAFICO.**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A:
GABRIEL MARIO MORALES URDIALES



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

	Página
INTRODUCCION	1
1.- LA CONTAMINACION AMBIENTAL	4
1.1.- La contaminación del agua	4
1.1.1.- El agua como medio de transporte	4
1.1.2.- Materiales que causan la contaminación	6
1.2.- Criterios para establecer el grado de contaminación de las aguas residuales	10
1.2.1.- Parámetros que definen la calidad del agua	11
1.3.- Muestreo	20
1.4.- Exigencias gubernamentales	22
1.4.1.- Ley federal de aguas	24
1.4.2.- Reglamento para la prevención y control de la contaminación de aguas	25
1.4.3.- Condiciones legales para el muestreo	27
2.- PROCESOS DE TRATAMIENTO DE VERTIDOS INDUSTRIALES	29
2.1.- Pretratamiento de desechos industriales	33
2.1.1.- Cribado	33
2.1.1.1.- Rejillas	33
2.1.1.2.- Mallas	34
2.1.1.3.- Desmenuzadores	34
2.1.2.- Igualación y proporcionalidad	35

	Pagina
2.1.3.- Mezclado	35
2.1.4.- Desarenadores	36
2.2.- Tratamiento primario	37
2.2.1.- Sedimentación	39
2.2.2. Flotación	43
2.2.3.- Neutralización	44
2.3.- Tratamiento secundario	47
2.4.- Tratamiento terciario	47
2.4.1.- Intercambio iónico	48
2.4.2.- Coagulación	49
2.4.3.- Adsorción y absorción	50
2.4.4.- Osmosis inversa	51
2.4.5.- Diálisis	51
2.4.6.- Desinfección	52
2.4.7.- Otros	53
3.- PROCESOS DE TRATAMIENTO PARA SOLIDOS ORGANICOS DISUELTOS (TRATAMIENTO SECUNDARIO)	54
3.1.- Proceso de lagunas de estabilización	56
3.2.- Proceso de lodos activados	83
3.3.- Proceso de filtros rociadores	105
3.4.- Proceso ' Biodiscos '	111

	Página
4.- ANALISIS GRAFICO	118
4.1.- Introducción a la teoría de gráficas	119
4.2.- Características a evaluar	121
4.3.- Desarrollo de modelos gráficos	126
4.3.1.- Modelo gráfico para el proceso de tratamiento de lagunas de estabilización	126
4.3.2.- Modelo gráfico para el proceso de tratamiento de lodos activados	141
4.3.3.- Modelo gráfico para el proceso de tratamiento de filtros rociadores	155
4.3.4.- Modelo gráfico para el proceso de tratamiento ' Biodiscos '	167
4.4.- Criterios de selección	177
4.5.- Aplicación de modelos en algunas industrias	181
5.- CONCLUSIONES	184
BIBLIOGRAFIA	189

INTRODUCCION

Actualmente, en México como en otros países, el deterioro ambiental ha alcanzado alturas anteriormente insospechadas. Muchas personas han considerado (o así lo han expresado) que esto es consecuencia (o el precio que se tiene que pagar), por el "progreso" que el hombre ha adquirido. De esta forma, establecen que el desarrollo tecnológico ha traído consigo la contaminación ambiental, con las consecuentes pérdidas naturales ya por demás comentadas. Es evidente, que esto es totalmente ilógico, y que de ninguna manera, este desarrollo tecnológico tiene que ir acompañado por los desastres ambientales, ocasionados por algunos hombres pertenecientes al sector público o privado ya sea por ambición, negligencia o apatía al respecto. A pesar de las leyes y reglamentos que el estado ha impuesto y que tienden a ser cada vez más restrictivas, en términos concretos, se ha hecho poco ya no para evitar, sino para disminuir los daños a los cursos de agua más importantes del país. Es precisamente el desarrollo tecnológico, mediante el enfoque de procesos y operaciones unitarias, quien permite la posible solución que existe en el problema de la contaminación.

Desde hace varios años, existen una gran variedad de procesos de tratamiento para aguas residuales domésticas y desechos industriales, cuyos costos de aplicación, deben sumarse a los costos de producción de la industria en cuestión (si no se desarrollara el tratamiento, entonces a los costos de producción, deberían agregarse los costos por concepto de deterioro ambiental).

Entre los contaminantes más comunes producidos en el país, están los materiales orgánicos, disueltos en los desechos de -

la industria textil, alimenticia, de gomas, papel, químicos, - etc. Y cuyo tratamiento, está basado principalmente en procesos de tratamiento biológicos tales como el proceso de lagunas de estabilización, lodos activados, filtros percoladores y sistema biodisco. Estos procesos constituyen generalmente la etapa secundaria de los procesos de tratamiento de aguas residuales, y están caracterizados fundamentalmente por la degradación del material contaminante y no por la remoción de éste, - como sucede en los demás procesos de tratamiento.

Generalmente la dirección industrial (por interés propio), establece que el mejor tratamiento para la empresa privada (y para algunas públicas) es el menos costoso en términos monetarios. Sin embargo, debe considerarse que el costo ambiental, social, regional, etc., es mucho mayor (aún si se tradujera a términos monetarios) que el proceso de tratamiento de aguas residuales más caro.

Los procesos de tratamiento biológicos, presentan varias características comunes entre sí, por lo que para la elección de uno entre los demás, se requiere de un estudio racional y sistemático, estableciendo la consideración de una serie de parámetros no solo afines a la industria, sino al medio social y ambiental que les rodea.

La teoría de gráficas, componente del enfoque de sistemas, tiene numerosas aplicaciones en diversos campos, modelando sistemas y presentando en forma visual las relaciones implicadas entre sus elementos; constituyendo pues, una herramienta de trabajo para analizar y tomar decisiones que se puedan justificar racionalmente.

En el presente trabajo, lo que se pretende es contrastar di

ferentes procesos de tratamiento de material orgánico disuelto, mediante modelos gráficos establecidos a partir de relaciones entre las diferentes características, que definen las propiedades de un proceso de tratamiento de aguas residuales. Para que, mediante este contraste, se obtengan los criterios de selección (costos del proceso, molestias producidas, etc.) más adecuados o de mayor peso que permitan evaluar en una etapa -- posterior, el mejor proceso de tratamiento, tanto para la industria como para el medio ambiente que le rodea.

1. LA CONTAMINACION AMBIENTAL.

En la introducción del presente trabajo, se indicaron las pretensiones deseadas y consecuentemente las limitaciones de esta tesis; sin embargo, debe considerarse que algunos aspectos generales sobre el tema, aunque ya ampliamente vistos y establecidos en casi todos los trabajos sobre el tratamiento de aguas negras y desechos industriales, deberán exponerse también aquí, como una consecuencia complementaria y/o de soporte, por su característica de conocimiento básico.

1.1 LA CONTAMINACION DEL AGUA.

1.1.1 EL AGUA COMO MEDIO DE TRANSPORTE.

De la gran diversidad de usos que tiene el agua, ésta puede ser usada como medio de transporte de desechos industriales en los cursos de agua, resultando interesante en estos casos, el hecho de que, en teoría, puede ser posible eliminar todas las impurezas del agua, puesto que, de ningún modo su estructura sufre algún cambio.

Independientemente de que esto sea no posible desde el punto de vista técnico y aún económico, lo importante es alcanzar cierto grado de pureza, dependiendo de los usos que se le llegue a dar a los cursos de agua o de las características funcionales que éstas tengan en la naturaleza. Lo anterior significa que no siempre se requiere una misma "calidad" de agua, sino que esta "calidad" depende más bien del uso que ésta tenga, ya sea si es empleada para riego, recreación, industria, granja, etc. Y por lo tanto, el grado de tratamiento hacia estos desechos, dependerá también, del posible uso que se le dé a los ríos aguas abajo. De esta manera, llegamos a encontrar-

clasificaciones de los cursos de agua dependiendo de su uso y por lo tanto, requerimientos gubernamentales diferentes (por ejemplo, curso clase (A) agua potable, por lo que requieren - las posibles aguas residuales que a el se viertan un tratamiento bastante depurado; curso clase (C) agua de pesca, el tratamiento en estos casos no será tan estricto como para la clase (A), pero sí deberá cubrir ciertos requisitos para no afectar la vida piscícola del lugar, y así, dependiendo de las "clases" son los requerimientos gubernamentales).

Cabe mencionar, que hay ocasiones en que a un curso de agua se le emplea únicamente como medio de transporte de los desechos industriales, por lo que el tratamiento (si es que se llega a hacer) no resulta tan riguroso, como en otros casos; a lo anterior, hay que agregar otra cosa, ¿qué pasa si la industria está situada en una ciudad y en lugar de mandar sus desechos a un río los manda a una planta de tratamiento de aguas residuales?; pues también la industria tendrá que desarrollar un tratamiento primario o por lo menos un pretratamiento, que consistirá principalmente en eliminar los ácidos, las bases y el material grueso, para no dañar el alcantarillado municipal; también deberá informar a la planta municipal de los constituyentes de sus contaminantes, para no dañar el equipo de la planta. Además, en este caso, deberá constatarse si la capacidad de la planta es suficiente tanto para asimilar los vertidos urbanos como los industriales (en ocasiones se exige a las industrias regular sus vertidos y no arrojarlos de "un solo golpe").

Sobre este tema, algunos ingenieros piensan que la industria debería tratar sus propios vertidos, sirviendo la planta municipal en estos casos, como protección adicional; sin embargo, la mayoría considera, que la industria deberá realizar tan solo un pretratamiento y la planta municipal deberá encargarse

de lo demás; argumentando por un lado, que la mayoría de los vertidos industriales contiene solamente algún constituyente contaminante principal y su eliminación permite que el líquido resultante se pueda tratar conjuntamente con los vertidos urbanos; y por otro lado, que el costo total o global del tratamiento, sería mucho menor, que el que resultara de la suma de los costos de los tratamientos aislados.

De lo anteriormente dicho, ya sea que los vertidos industriales sean mandados a un río o a una planta municipal, resulta indispensable que la industria desarrolle por lo menos un pretratamiento a sus desechos y que las aguas que finalmente van a vertirse a los ríos, ya sea su origen directamente de la industria o de plantas municipales deberán cumplir con ciertos requisitos de calidad química, física y biológica. Lo que evidentemente se logra, eliminando el material contaminante de los desechos industriales.

1.1.2 MATERIALES QUE CAUSAN LA CONTAMINACION.

Actualmente existen una gran variedad de clasificaciones de contaminantes, cada una de las cuales se apega a un trabajo específico (igual que la clasificación que se verá aquí), para entender claramente estas clasificaciones, es importante saber con exactitud que es lo que hace que un material sea contaminante; podríamos por ejemplo, decir que todo material en exceso resulta contaminante (lo cual podría parecer una respuesta bastante extensa, aunque ambigua), sin embargo, la misma agua en su estado casi puro, resulta contaminante, cuando ésta se vierte a los ríos o al mar a temperaturas elevadas (las aguas de los condensados de las industrias por ejemplo) o materiales como el arsénico, que en cantidades mínimas, resulta sumamente peligroso. De aquí que, para dar una definición que pueda abar

car a todo tipo de contaminantes, diremos que, un material contaminante es aquel, que degrada de alguna manera las cualidades físicas, químicas y/o biológicas de las aguas que lo reciben.

Una de las clasificaciones más comunes de los contaminantes, está basada por las propiedades biológicas, físicas y químicas que puedan contribuir a la degradación de las aguas que lo reciben; en nuestro caso, estableceremos una división de acuerdo a las características del contaminante en el agua (la razón de esta clasificación, se basa en el hecho de que, materiales con las mismas características contaminantes, sólidos orgánicos disueltos por ejemplo, reciben tratamientos de depuración similares). Los grupos de contaminantes más comunes son:

a) SALES INORGANICAS. En este caso, la contaminación no se produce por la sola presencia de estos materiales, sino más bien por el exceso de estos. Tienen un efecto considerable en la industria (aguas abajo) debido sobre todo a la dureza originada por el Ca, Mg y Si; produciendo problemas principalmente de incrustaciones en los equipos. Pueden tener efectos considerables también en la vida acuática si se encuentra en cantidades excesivas; las industrias más comunes que originan este contaminante, son las industrias de gomas y madera, fertilizantes, curtidos de cuero, industrias generadoras de energía (producción de vapor), metalurgia, cerámica, etc.

b) ACIDOS Y BASES. La descarga de estos a plantas municipales o a ríos, debe contemplarse muy seriamente, si se descargan a plantas municipales pueden afectar la red pública y dañar el equipo de procesamiento de ésta; en caso de que desechos alcalinos o ácidos se descarguen a ríos sin antes tratar-

se, valores de pH mayores de 9.5 y menores de 4.5, prácticamente exterminan la vida acuática de éstos. Por otro lado, si el río es empleado para actividades recreativas, el tratamiento de éstas sustancias deberá ser total para no ocasionar daños a los nadadores, ni efectos corrosivos a los posibles barcos que en él se encuentren, estos desechos son producidos generalmente por las industrias de manufacturas química y textil, pasta y papel, lavanderías, drenajes de minas de carbón, bebidas suaves, aceros, plásticos y resinas, fotografía, etc.

c) **SOLIDOS EN SUSPENSION.** Pueden originar la disminución de oxígeno disuelto en el agua; ocasionan problemas en el desplazamiento de las aguas y cierta turbiedad en éstas, produciendo con esto, la inutilización del río para el recreo; a veces ocasionan también malos olores y si se vierten en la red pública ocasionan obstrucciones en el alcantarillado; las industrias más comunes que producen este desecho son: textiles, alimentos enlatados, farmacéutica, café, papel, aceros, fundiciones, etc.

d) **SOLIDOS Y LIQUIDOS FLOTANTES.** Su principal efecto sobre los cursos de agua, es que impiden la reaireación natural del agua, ocasionando con esto un gran déficit de oxígeno en ésta. Por otro lado; grasas, aceites o materiales que flotan en el agua, son generalmente tóxicos, dañando a los peces y a las aves acuáticas (además hay que considerar, los depósitos anaeróbicos que estos producen en el fondo de los ríos y muchas veces un olor bastante desagradable).

Por si lo anterior fuera poco, cuando estos materiales están en grandes cantidades, producen riesgos de incendios; las industrias más comunes que los producen son: las refinerías, detergentes, molinos de azúcar y remolacha, etc.

e) AGUA A TEMPERATURA ELEVADA. Esta es característica de la descarga de los condensadores y purgas de calderas; alteran la temperatura de las aguas ocasionando mas efectos de los que la mayoría cree. Así, puesto que el oxígeno presenta una curva de solubilidad invertida en el agua, con respecto a la temperatura; a medida que la temperatura en el agua es mayor, se disuelve menos oxígeno en esta, ocasionando con esto la muerte de peces por asfixia, además las aguas con temperaturas elevadas, incrementan la acción bacteriana, ocasionando también con esto una disminución de oxígeno en ésta.

f) PRODUCTOS QUIMICOS TOXICOS. Puede desarrollarse un efecto de estos productos hasta en concentraciones extremadamente bajas; entre los tóxicos principales encontramos, As, CN, Cr, Cd, Cu, F, Hg y Zn. Este tipo de contaminantes ocasiona la muerte de plancton, peces, ganado, etc. Ocasionan con esto también, acumulamiento de carne de peces y moluscos muertos en los ríos; las industrias que producen este tipo de desecho son: fabricación de cloro, acumuladores, enlatado, limpieza de metales, curtiduría, etc.

Otro tipo de tóxicos que debemos considerar también son los plaguicidas aldrín, DDT, herbicidas, etc.

g) CONTAMINANTES BIOXIDABLES. La característica de estos materiales es su consumo de oxígeno (que es tan vital para la vida acuática) el representativo común de éstos es la materia orgánica (contaminantes orgánicos), las consecuencias comunes encontradas en este tipo de contaminación es la de peces muertos, situaciones anaeróbicas y malos olores (estos últimos son ocasionados por la degradación bacteriana de la materia orgánica) las industrias comunes que ocasionan estos contaminantes son: refinado de azúcar, destilería, cervecería, leche, pulpa, papel, etc.

h) ORGANISMOS PATOGENOS. Este tipo de contaminación resulta ser sumamente peligrosa, si los cursos de agua donde sean arrojados son empleados como abastecimientos públicos, ocasionando infecciones no solo en el hombre, sino que también en la ganadería, enfermedades en las plantas procedentes de las aguas de riego contaminadas con hongos, etc. Los microorganismos patógenos más comunes son B. Anthracis, leptospira, hongos tóxicos, virus, etc. Cabe mencionar que no todos los microorganismos son patógenos (algunos se les utiliza para la degradación de materia orgánica como se verá mas adelante), producen este contaminante las industrias de procesado de lana, mataderos, - industrias procesadoras de pollos, etc.

i) MATERIALES RADIOACTIVOS. Hace referencia logicamente a los productos radiactivos como los radioisótopos, aunque las medidas de seguridad, para evitar este tipo de contaminación - parecen óptimas actualmente, siempre deberá considerarse su efecto potencial sobre la ecología.

Por último, es necesario considerar como contaminantes a materiales tales como trapos, plumas, cartones, latas, etc. - Que pueden tener un efecto de obstrucción en tuberías cuando los desechos sean mandados a plantas municipales o impedir la reaireación en los ríos.

1.2 CRITERIOS PARA ESTABLECER EL GRADO DE CONTAMINACION DE LAS AGUAS RESIDUALES.

Para lograr cierta calidad en el agua, se requieren considerar ciertos parámetros, que a final de cuentas establecen los límites de lo que se podría considerar como un vertido aceptable por las autoridades correspondientes; de aquí que, resulta importante conocer dichos parámetros y las unidades comunes

en que se manejan; además, resulta imperativo marcar el hecho de que, para hacer una medición correcta de dichos indicadores, será necesario haber efectuado un muestreo adecuado y confiable a las necesidades requeridas.

1.2.1 PARAMETROS QUE DEFINEN LA CALIDAD DEL AGUA.

Como se comentó anteriormente, la calidad del vertido exigido por las autoridades, depende de la utilización que tenga el curso de agua al que sean arrojados dichos vertidos, si los desechos industriales son mandados a una planta municipal, la calidad de ésta también dependerá de la situación existente; así por ejemplo, si los desechos son arrojados a un río cuyo uso sea para el abastecimiento público del agua, los parámetros esenciales a considerar serán (bacterias, sólidos totales en suspensión, pH, temperatura, etc.) lo cual diferirá si las aguas se emplean para riego. Sin embargo, podemos establecer una lista general de los parámetros más comúnmente usados (desde un punto de vista radical, la lista de contaminantes dada anteriormente, representa por sí misma, parámetros que definen la calidad de agua, puesto que a final de cuentas, resultan ser indicadores de contaminación), sin embargo, lo que pretende en esta sección, es definir la terminología de indicadores más comúnmente usada en el tratamiento de efluentes.

a) **OXIGENO DISUELTO.** Puede encontrarse en unidades porcentuales de saturación o en unidades de concentración (esta última en unidades de mg/lit o p.p.m., en términos numéricos ambas unidades mg/lit o p.p.m. equivalen a lo mismo).

Su presencia en el agua no solo contribuye a la oxidación de la materia, sino que también es esencial para la vida piscícola, su valor en el agua oscila dependiendo de la superficie

de aireación, temperatura existente, materia orgánica disuelta, etc.

En aguas no contaminadas, su valor es cercano al de saturación (a 20°C, su valor de saturación es cercano a 9.2 p.p.m.).

Algunos autores (1), establecen que el punto crítico para la vida acuática es de 3.5 p.p.m. (aunque esto resulta ser bastante variable, por ejemplo la trucha no vive a una concentración inferior de oxígeno de 5 p.p.m., mientras que la carpa puede sobrevivir a una concentración de 1 p.p.m.). En resumidas cuentas, a medida que el oxígeno disuelto en el agua se aproxime a cero, indicará una mayor contaminación.

La reposición del oxígeno disuelto (OD) en aguas que tienen déficit de éste, resulta ser lenta en comparación con su consumo; se repone por aireación natural en la superficie y por el oxígeno producido por la fotosíntesis de las plantas acuáticas (cuando la reposición es por medios naturales).

Existen varios procedimientos para calcular el déficit de oxígeno disuelto bajo el agua (D_t), la forma más común de cálculo es por medio de la fórmula de Streeter-Phelps (1):

$$D_T = \frac{K_1 L_a}{K_2 - K_1} [10^{-K_1 L} - 10^{-K_2 L}] + D_a (10^{-K_2 L}) \quad \dots \quad (1.1)$$

Donde:

$$K_1 = \text{Constante de desoxigenación (1/días)} \quad K_1 = \frac{1}{\Delta L} \log LA/LB$$

$$K_2 = \text{Constante de reaeración (1/días)} \quad K_2 = K_1 \frac{L}{D} - \frac{AD}{2.3 \Delta L D}$$

$$\Delta L = \text{Tiempo de paso entre los puntos en que se toma la muestra (días)}$$

T = Tiempo que tarda el agua en recorrer el tramo considerado (días)

La = DBO final (se refiere al promedio de las muestras) en el punto aguas arriba (p.p.m.)

Lb = DBO final en el punto de aguas abajo (p.p.m.)

\bar{L} = DBO final media en el tramo considerado (p.p.m.)

Da = Déficit en oxígeno disuelto en el punto de aguas arriba - (p.p.m.)

\bar{D} = Déficit medio de oxígeno, disuelto en el tramo considerado (p.p.m.)

AD = Diferencia de los déficit de oxígeno disuelto, entre los puntos considerados.

b) pH. El valor deseado del pH, depende mucho de las funciones que tenga el curso de agua, así por ejemplo, para la vida piscícola y animales de vida libre, su valor puede oscilar entre 5 y 9; si las aguas son empleadas para riego, su valor puede estar entre 4.5 y 9. En términos concretos, puede observarse que las aguas no deben estar ni muy alcalinas, ni muy ácidas (un valor entre 6 y 8.5 en pH, se considera como un valor adecuado en la mayoría de cursos de agua), sin embargo, hay cierta preferencia hacia la alcalinidad, ya que la acidez, puede provocar mayores daños.

c) DUREZA. Está constituida principalmente por $CaCO_3$ y $MgCO_3$. La dureza en pequeñas cantidades, no afecta en mucho la vida piscícola (aunque en cantidades excesivas sí); pero sí puede pre-

sentar efectos si las aguas son empleadas para abastecimientos públicos o para procesos industriales; una valor adecuado de la dureza está entre 60 y 120 partes por millón (pero un valor inferior a 500 p.p.m. se considera aceptable); cuando el agua es empleada como agua de proceso, debe tenerse cuidado al trabajar con este parámetro, así por ejemplo, en el teñido de los tejidos, debe tener una dureza de casi cero, al usarse en calderas para la generación de vapor, si no se trata, produce incrustaciones en ésta, etc.

d) **SOLIDOS TOTALES DISUELTOS (STD).** Resulta ser uno de los términos más empleados en el tratamiento de aguas negras y desechos industriales, se trabaja en unidades de concentración ya sea en p.p.m. ó mg/lit; este término, que como su nombre lo indica, hace referencia al total de sólidos disueltos en el agua, tales como Ca, Mg, SiO₂, etc. Su valor máximo aceptado, depende del uso que se le llegue a dar al agua, así por ejemplo, para abastecimientos públicos un valor entre 200 y 500 p.p.m. es aceptable, para riego su valor puede oscilar entre 0 y 5000 p.p.m., para abastecimiento de aguas para granjas entre 500 y 5000 p.p.m., etc., sin embargo, cuando su concentración es mayor de 500 p.p.m restringe las consecuencias laxantes y el sabor en el agua.

Cabe mencionar, que los valores de este parámetro, en ocasiones puede definirse en términos de conductividad y su forma de determinarlo es mediante un solidómetro generalmente.

e) **SOLIDOS EN SUSPENSION.** Representa el material que se encuentra suspenso en los cursos de agua, resulta ser uno de los parámetros más usuales en el tratamiento de desechos industriales, se trabaja en unidades de concentración, p.p.m. ó mg/lit., su tratamiento generalmente resulta ser sencillo (normalmente

rejillas y sedimentación) lo más deseable es de que no estén presentes en los vertidos, sin embargo, se encuentran presentes en casi todos los vertidos industriales (generalmente 5 p.p.m. en industrias de tintes y blanqueado, 10 p.p.m. en la industria del petróleo y hasta 500 partes por millón en la industria cementera), lo anterior se puede comparar con la composición aproximada del agua residual doméstica (4) cuyo total de sólidos suspendidos (sedimentables y no sedimentables) es de 275 mg/lt., en resumidas cuentas entre menor sea el valor de sólidos suspendidos, es de esperarse una menor contaminación del agua.

f) TEMPERATURA. Resulta ser un parámetro útil, por su influencia principalmente en la dilución de oxígeno en el agua, obsérvese en la siguiente tabla su influencia en la cantidad de oxígeno disuelto:

TABLA (1.1)

<u>TEMPERATURA (°C)</u>	<u>O.D (SATURADO) (p.p.m.)</u>
0	14.6
4	13.1
8	11.9
12	10.8
16	10.0
20	9.2
24	8.5
30	7.6

Además de su influencia en el oxígeno disuelto, la temperatura también afecta la vida acuática, actualmente se han establecido temperaturas provisionales máximas recomendadas para el bienestar de varias especies de peces y su biota asociada (1).

Como ejemplo de lo anterior tenemos como temperaturas máxi

mas:

- 34°C Crecimiento de pez gato, Lubina manchada, alevines - de carpa, etc.
- 27°C Desove y desarrollo de los huevos del pez gato, alsa, etc.
- 18°C Crecimiento o emigración de los salmónidos y desarrollo de los huevos de las percas.
- 13°C Desove y desarrollo de los huevos del salmón y la trucha.
- 7°C Desove y desarrollo de los huevos de la trucha de lago.

Los datos anteriores fueron sacados de (1), de donde puede observarse, que la temperatura es uno de los factores determinantes biológicos que hay establecidos, y hasta pequeños aumentos de temperatura de 1.5 a 3°C ocasionan la emigración de los peces del lugar.

Desde el punto de vista, puede considerarse que los vertidos al agua no debieran exceder temperaturas de 35°C, aunque lo mas recomendable sería que estos valores fueran a temperaturas menores de 29°C.

g) COLOR. Este parece ser a primera vista, un indicador de peso, del grado de contaminación de las aguas (aunque generalmente es un indicador muy superficial).

En términos concretos carece de unidades físicas, sin embargo, se puede manejar como porcentaje de luz que penetra hasta el fondo; resulta importante comentar, que la coloración ocasionada por los contaminantes, al interferir el paso de la

luz dentro del agua, ocasiona la disminución de la acción fotosintética de los vegetales que se encuentran en ésta, colaborando con esto, a la disminución del oxígeno disuelto en el agua.

h) TURBIDEZ. El grado de turbidez en las aguas, medido en p.p.m. ó en mg/lt., es un parámetro que nos indica la cantidad de materia fina suspendida (generalmente coloidal) cuya característica principal, es aumentar la densidad óptica de las aguas (la materia que causa la turbidez, generalmente también es causante del color de las aguas), lo más deseable para cualquier curso de agua y abastecimiento de ésta, es que no haya turbidez, sin embargo la vida piscícola puede desenvolverse en aguas turbias, siempre y cuando el valor máximo no exceda de 50 p.p.m.

i) NITROGENO TOTAL KJELDAHL. Es el formado por la conjunción del nitrógeno proveniente de la materia orgánica y del proveniente del amoníaco, su presencia evidencia vida orgánica (también estimula el crecimiento del lirio acuático), se mide en unidades de concentración y su valor deberá ser, lo más bajo posible; se considera como valor aceptable de 1 p.p.m. por encima de su valor natural.

j) DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO (DBO). Generalmente el oxígeno está disuelto casi hasta su saturación en aguas de ríos frescas y claras, esta cantidad de oxígeno en el agua, se mantiene casi constante debido al equilibrio que se establece entre el oxígeno que se disuelve en el agua por aireación y fotosíntesis vegetativa y por otro lado, por el oxígeno consumido por los peces y la degradación de la materia orgánica natural; sin embargo, si en estas aguas se encuentran contaminantes orgánicos éstos sufrirán oxidaciones orgánicas bioquímicas, que consumirán gran parte del oxígeno disuelto en el agua; si este con

sumo es mayor que el oxígeno que es capaz de absorberse o producirse en el agua, entonces habrá un déficit de oxígeno con las consecuencias ya por demás comentadas.

La degradación de dichos contaminantes orgánicos es efectuada por bacterias que utilizan el oxígeno para lograr dicha degradación, ya que este material constituye en resumidas cuentas, su alimento y fuente de energía.

La DBO es un parámetro que nos indica, la cantidad de oxígeno requerido por una muestra de agua, para degradar, descomponer u oxidar los desechos orgánicos de las aguas residuales, a una temperatura de 20°C y por un período de 5 días (DBO₅) - (dicho en otras palabras, la DBO nos indica el potencial contaminante de los desechos); este se mide en p.p.m. o mg/lit, para su medición en caso de aguas residuales domésticas, se toma aproximadamente el 5% de una muestra, que se diluye en 2 botellas bien tapadas con agua aireada, el oxígeno disuelto (OD) - se mide inmediatamente en una de ellas y la segunda se mantiene a 20°C por un período de 5 días, junto con otra botella que contenga agua pura (ésta sirve como prueba en blanco), las bacterias consumirán durante 5 días parte del oxígeno para degradar sus alimentos y producir su energía necesaria, al cabo de 5 días se determina cuanto oxígeno disuelto quedó en la segunda botella y por diferencia entre la primera y la segunda botella se obtiene el oxígeno utilizado por los microorganismos - (en aguas residuales domésticas, no se requiere siembra de bacterias, pero en la mayoría de los desechos industriales sí); algunos autores (26) indican que la forma de las curvas DBO₅, son mucho menos significativas que si estuvieran determinadas por alrededor de 20 días (se refiere esto a curvas DBO vs tiempo) excepto quizás para efluentes secundarios; en nuestro caso cuando tratemos con DBO₅, lo expresaremos sencillamente -

como DBO. Logicamente, al tratarse un desecho industrial, debe procurarse que su valor resultante de DBO, sea el menor posible; valores aceptables de éstos deben ser inferiores a 2 p. p.m.

k) DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO (DQO). La característica especial de este parámetro, es de que, a diferencia de la DBO, no mide solamente la cantidad de contaminantes orgánicos, sino - que también todos aquellos contaminantes inorgánicos oxidables, ésta representa una medida, de determinada demanda de oxígeno por oxidación química (su medición se desarrolla por medio de una reacción química, que se realiza en reflujo con una solución de ácido dicromato (26)), este parámetro representa la forma más rápida de determinar la calidad el agua residual.

Al igual que la DBO, su valor deberá tender después de un tratamiento al menor posible, sus unidades son en p.p.m. o mg/lit.

1.3 MUESTREO.

Esta etapa es esencial en el tratamiento de aguas negras y desechos industriales, puesto que, si el muestreo realizado no es adecuado, todo trabajo desarrollado para evitar la contaminación del agua, será estéril.

Entre las recomendaciones más usuales (1) para realizar el mejor muestreo posible están:

- a) Resulta mucho más conveniente, utilizar pocos puntos de muestreo y de estos puntos tomar varias muestras, que hacer un muestreo en muchos puntos.
- b) Estos pocos puntos de muestreo deben incluir la toma de muestras en; (1) aguas arriba de la fuente de contaminación; (2) aguas abajo de la fuente de contaminación; (3) el punto donde la experiencia o cálculos indiquen una menor cantidad de oxígeno disuelto; y (4) un punto a la mitad entre el punto (3) y la recuperación del nivel de oxígeno.
- c) Procurar tomar las muestras, en puntos accesibles al muestreo, ya sea donde haya puentes, muelles o cualquier otro lugar que facilite la toma de la muestra, siempre y cuando se tenga la certeza de que las muestras tomadas en este lugar sean representativas.
- d) Se deben tomar muestras en diferentes épocas del año, incluyendo las épocas de estiaje.
- e) Los niveles en profundidad recomendables para tomar las muestras, deberán estar entre 0.2 y 0.8 de la profundidad total del agua.

- f) Se deberá desarrollar una formulación estadística de los datos, lo mas adecuada posible.
- g) Las muestras deberán ser analizadas lo más rápido posible (en el mismo lugar de ser posible).
- h) Las características de los recipientes que contengan las muestras deberán ser consideradas (dependiendo estos, de las propiedades de las muestras) así por ejemplo, deberán evitarse botellas de plástico para solventes orgánicos; - no utilizar recipientes con tapones de metal para transportar muestras en las cuales haya que determinar metales, etc.

Finalmente, la experiencia de algunos autores (1), consideran que la determinación del caudal, temperatura, DBO, y oxígeno disuelto, en el estudio de las muestras, proporcionan la información suficiente, para proyectar plantas de tratamiento de aguas residuales (compárense las características del muestreo recomendado y las exigencias gubernamentales pedidas en el muestreo que aparecen en la siguiente sección).

cas; existen ecosistemas considerablemente degradados y zonas totalmente destruidas como lo son los pantanos y lagunas localizados entre Minatitlán y Coatzacoalcos; donde los desechos industriales, no solo han extinguido la vida animal, sino que, la vegetación arbórea sumamente frondosa anteriormente, hacia-1972, no eran mas que troncos secos...".

Sería en este caso, interesante saber, si al precio en que se vende el petróleo mexicano (como ejemplo) está considerado el costo por concepto del desgaste de nuestro medio ambiente.

Es muy sabido que en México (al igual que en muchos otros países), la mayoría de industrias contaminan el ambiente sin el menor reparo posible, importándoles solo, los beneficios que obtienen por la producción de los bienes o servicios que producen.

De esta manera, puesto que los industriales no tienen... la intención de evitar la contaminación a expensas del "sacrificio" de ciertos beneficios para ellos, el gobierno mexicano en defensa de los intereses de la nación... estableció a principios de los 70's una legislación en México para prevenir y controlar la contaminación del agua (leyes que se respetan de la misma manera que las leyes que prohíben latifundios, leyes que garantizan elecciones libres, etc.).

Al respecto, existen en México tres reglamentos básicos:

- LEY FEDERAL DE AGUAS,
- LEY FEDERAL PARA PREVENIR Y CONTROLAR LA CONTAMINACION AMBIENTAL,
- REGLAMENTO PARA LA PREVENCION Y CONTROL DE LA CONTAMINACION DE AGUAS.

1.4 EXIGENCIAS GUBERNAMENTALES (LEYES Y REGLAMENTOS).

Muchas personas consideran, que el avance científico, junto con el desarrollo tecnológico son los causantes del actual-deterioro ambiental (por lo menos esto ha parecido en la mayoría de países, ya que a medida que se incrementa su desarrollo industrial aumenta la contaminación de su medio ambiente).

Sin embargo esto es falso, ya que, resulta mas que evidente, el hecho de que aplicando los conocimientos científicos - eficazmente es perfectamente posible la coexistencia del hombre industrializado con su medio ambiente. "La evolución económica, de ninguna manera debiera implicar la destrucción o - desquiciamiento del equilibrio natural, sino el mejoramiento - de los recursos naturales"*.

En 1978 se presentó un reporte sobre la contaminación del río Coatzacoalcos (32), donde se establecía la política ambiental, que el gobierno mexicano seguiría a partir de este año en esta zona; entre las "denuncias" manifestadas en este reporte-aparecía lo siguiente:

"... anteriormente la contaminación no era tan palpable, debido a que la capacidad de dilución y autopurificación de - los recursos disponibles eran suficientes para absorberlos, pero como el límite de saturación se ha superado, la contaminación no solo ha afectado la flora y la fauna del lugar, sino - que a llegado directamente al hombre a través de la cadena alimenticia..".

"Las aguas del río Coatzacoalcos en sus últimos tramos, - se encuentran sumamente contaminadas por las descargas industriales, disminuyendo significativamente las especies acuáti -

* Memorándum Técnico No. 110. SARH.

1.4.1 LEY FEDERAL DE AGUAS.

Esta ley (24), fué expedida el 30 de diciembre de 1971; - en ésta se establece todo lo relativo al uso de las aguas (en general) en México, entre los artículos más importantes (relacionados con este trabajo) encontramos:

ART. 5° Son aguas de propiedad de la nación:

- II) Las aguas marinas interiores,
- III) Las de lagunas y esteros que se comuniquen permanente o intermitentemente con el mar,
- IV) Las de los lagos interiores,
- V) Las de los ríos desde su inicio hasta su desembocadura.

ART. 6° Son también propiedad de la nación:

- IX) La flora y la fauna acuáticas, las sustancias y demás materiales que contengan las aguas de propiedad nacional.

ART. 16° Son atribuciones de la Secretaría (SARH):

- XXII) Suspender todas aquellas obras que dañen los recursos hidráulicos nacionales, y las que degraden el equilibrio ecológico de una región.

ART. 175° La Secretaría (SARH) sancionará conforme lo previsto por esta Ley, las siguientes faltas:

- I) Arrojar sin permiso, en los causes o vasos de propiedad nacional, aguas de desechos industriales.

ART. 176° Las faltas a que se refiere el artículo anterior, serán sancionadas a juicio de la Secretaría (SARH) con multa que va de 100 a 10,000 pesos.

1.4.2 REGLAMENTO PARA LA PREVENCIÓN Y CONTROL DE CONTAMINACIÓN DE AGUAS.

Este reglamento fué expedido el 23 de marzo de 1971; entre las obligaciones que establece esta legislación a los responsables de descargas tenemos:

- Queda prohibido arrojar a las redes colectoras, ríos, cuencas, cauces y demás depósitos de agua, aguas residuales que contengan contaminantes, materias radiactivas o cualquier otra sustancia dañina a la salud de las personas, flora, fauna,...
- Las aguas residuales provenientes de usos públicos, domésticos o industriales, que descarguen en los sistemas de alcantarillado de las poblaciones o en las cuencas, ríos, vasos, mares y demás depósitos y corrientes. Así como las que por cualquier medio se infiltren en el subsuelo y en general las que se derramen en el terreno, deberán reunir las condiciones necesarias para prevenir:
 - a) Contaminación de los cuerpos receptores.
 - b) Interferencias en los procesos de depuración de las aguas.
 - c) Modificaciones, trastornos, interferencias o alteraciones en los aprovechamientos, en el funcionamiento adecuado de los cauces, vasos y demás depósitos de propiedad nacional, así

como de los sistemas de alcantarillado.

El permiso de descarga consta de dos partes, la primera - autoriza la descarga de aguas residuales y la segunda condiciona la calidad y cantidad de la descarga y establece las medidas técnicas y legales a que ésta deberá sujetarse.

En base a este reglamento, deberá realizarse un registro de todas las descargas de aguas residuales provenientes de usos industriales, municipales, etc. Con excepción de los usos domésticos; dicho registro deberá indicar las características de las descargas y entregarse en menos de cuatro meses a las autoridades correspondientes (si no, la industria será multada con 5,000 pesos).

Entre los artículos más importantes de este reglamento, - (Art. 13) encontramos, los parámetros máximos tolerables, a los cuales todas las industrias deberán "ajustarse", en un plazo - máximo de 3 años a partir de la fecha de registro;

SOLIDOS SEDIMENTALES	1.0 mg/lt.
GRASAS Y ACEITES	70.0 mg/lt.
MATERIA FLOTANTE	Ninguna que pueda ser retenida - por una malla de 3mm de claro li <u>bre</u> cuadrado.
TEMPERATURA	35°C
pH	4.5 a 10

El incumplimiento de esta obligación es sancionado conform

me a lo dispuesto en el artículo 53 del mismo ordenamiento legal, con clausura y multa hasta de 50,000 pesos.

Las industrias que deseen tratar sus vertidos en una planta municipal, tendrán que ajustarse al pago de cuotas por este concepto (el pago será fijado por las autoridades locales), - las industrias que no quieran el tratamiento en plantas municipales, deberán tratar sus propios desechos, ajustándolos a los parámetros ya establecidos.

Además, deberá presentarse un informe preliminar de ingeniería en menos de diez meses (comprende la revisión de sistemas de aguas residuales, muestreo y análisis de calidad de cada una de las descargas de los sistemas de resolución).

En lo referente a las sanciones, podemos resumir que éstas van de 100 a 50,000 pesos.

1.4.3 CONDICIONES LEGALES PARA EL MUESTREO.

De acuerdo a la metodología aplicada para la preservación del curso de agua, es necesario para desarrollar un muestreo:

- a. Serán puntos obligados de muestreo los siguientes:
 - a.1 La parte más cercana al nacimiento de la corriente, donde se supone que ésta no tiene aún usos y no recibe descargas de aguas residuales, con el fin de conocer las condiciones iniciales, a este punto se le llama estación testigo.
 - a.2 Antes, sobre y después de cada afluente de la corriente en estudio.

- a.3 Antes y después de cada cambio de sección y de pendiente.
- a.4 A la entrada y salida de las presas o lagos.
- a.5 Antes, sobre y después de cada canal de extracción.
- a.6 Como mínimo en 2 puntos intermedios de cada segmento establecido.
- b. La frecuencia de muestreo deberá cumplir con:
 - b.1 Las muestras deben hacerse en un tiempo mínimo de 6 semanas y un tiempo máximo de 5 meses, con el objeto de obtener una cantidad representativa de datos y evitar la época de avenidas.
 - b.2 Se deben tomar por lo menos 12 muestras de cada punto de muestreo, durante el período que dure el estudio, para obtener los valores medios y la desviación estándar.

2. PROCESOS DE TRATAMIENTO DE VERTIDOS INDUSTRIALES.

Como ya se indicó en el capítulo anterior, los cursos de agua tienen una capacidad limitada para asimilar las cargas contaminantes; cuando estas cargas están formadas principalmente por material orgánico, se requiere de oxígeno para su estabilización; el oxígeno disuelto en el río depende de algunas condiciones tales como (en el capítulo anterior ya se mencionaron algunas), la velocidad del flujo, profundidad del curso de agua, temperatura del agua y actividad en el fondo del río.

Los ríos pueden estabilizarse a lo largo de su curso por medio de una recuperación natural, denominada autopurificación de las aguas; así, cuando se vierte una determinada descarga contaminante en un río, encontramos que la recuperación de éste (siempre y cuando las características del contaminante lo permitan) se desarrolla a través de una serie de cambios ecológicos, de esta manera encontramos 4 zonas en el trayecto del río con características específicas:

a) Zona de degradación. Localizada inmediatamente "abajo" del punto de descarga. Se observa en esta zona; producción de sedimento, desaparición de peces y lógicamente una disminución de oxígeno disuelto (OD). Debido a las condiciones sépticas y a gases tales como H_2S y CH_4 encontramos malos olores en la zona. Aumento de bacterias y debido a la turbiedad (que no permite la penetración de la luz) impedimento de la fotosíntesis.

b) Zona de descomposición. En esta encontramos, desaparición de la vida piscícola; el OD se abate totalmente (si la carga orgánica es muy alta); aparición de espuma en la superficie y lodos flotantes (debido al empuje de los gases que se producen por descomposición de los sedimentos del fondo del

río); debido a las condiciones sumamente sépticas, las aguas adquieren un color grisáceo.

c) Zona de recuperación. Recuperación paulatina del OD (en ocasiones del 40% del de saturación), aparición de vida microscópica y de algunos peces; el agua empieza a perder su turbiedad; hay crecimiento de algas unicelulares y desaparición de hongos; la materia orgánica se empieza a estabilizar.

d) Zona de equilibrio. Recuperación total del OD y aparición normal de la vida acuática.

No obstante que se pueda esperar una autopurificación de las aguas, cabe establecer de manera clara y concisa, que no existe una fórmula matemática para determinar la longitud del río necesaria para obtener la zona de equilibrio, sino mas bien, dependerá de una serie de factores tales como el grado de contaminación, condiciones ambientales, tipo de contaminantes, etc.

Independientemente de que se pueda o no, calcular la longitud necesaria para que un río alcance su autopurificación (teóricamente hablando), hay contaminantes que no pueden ser degradados en forma natural; de aquí que, se hace necesario, el desarrollo de técnicas de tratamiento para mantener los cursos de agua con la mayor calidad posible para el beneficio de todos.

"Todos los procesos naturales de autopurificación de un río, pueden comprimirse en el tiempo y en el espacio, en una serie de uno o mas procesos unitarios, en el tratamiento de aguas residuales" (12).

Los procesos de tratamiento de aguas residuales, comenza -

ron hace mucho tiempo, así, su purificación por filtración a través de arena y grava gruesa data de hace siglos, sin embargo los procesos de tratamiento de aguas residuales empezó "de manera formalizada" a principios de este siglo en los Estados Unidos, donde ya existían plantas grandes y efectivas en las que se aplicaban los procesos unitarios de aireación, decantación, coagulación química, filtración, etc.

Actualmente existen diferentes divisiones de los procesos de tratamiento de aguas residuales, así encontramos:

a) División que hace referencia al proceso fundamental desarrollado en el tratamiento; (división común en los textos); tales como tratamiento químico, tratamiento físico, tratamiento-fisicoquímico y tratamiento biológico.

b) División de acuerdo con las características del contaminante en el agua. Así encontramos la división como tratamiento de sólidos orgánicos disueltos, tratamiento de sólidos en suspensión, tratamiento de sólidos coloidales, tratamiento de ácidos y alcalis, etc.

c) Finalmente, división de acuerdo a la etapa de tratamiento que recibe; tal que tratamiento preliminar, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario.

Para la descripción de los diferentes procesos de tratamiento, emplearemos la división de acuerdo a la etapa de tratamiento que recibe el desecho industrial; ya que muchas veces en un determinado tratamiento, existen diferentes tipos de procesos.

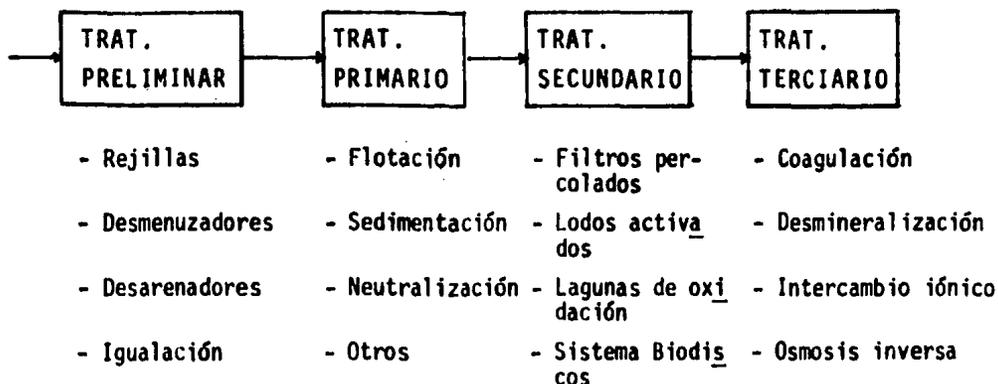
Cabe acordar en este momento, que el objetivo esencial de

este trabajo, no es la descripción detallada de estos procesos de tratamiento; sino mas bien, esto se hace debido a que cuando se desarrolla un proceso para el tratamiento de materiales orgánicos disueltos tales como filtros percoladores, lodos activados, lagunas de oxidación, etc. Se desarrollan también - otros tipos de procesos tales como la sedimentación, cribado, etc. Además de que, resulta importante ubicar los procesos de tratamiento de efluentes para la eliminación de sólidos orgánicos disueltos, en un contexto general de tratamiento de aguas negras y desechos industriales.

Por otro lado, cabe mencionar que dichos procesos para la eliminación de sólidos orgánicos disueltos, no serán descritos en este capítulo (que describirá los otros procesos de tratamiento de manera superficial) sino que se estudiarán en el capítulo 3 de forma más extensa, puesto que son los procesos de tratamiento que analizaremos mediante modelos gráficos.

La siguiente figura (fig. 2.1), establece el proceso de tratamiento de residuos líquidos por medio de las diferentes etapas:

FIGURA (2.1)



- Otros

- Combustión húme
da

- Diálisis
(electrodiálisis)

- Otros

- Adsorción

- Absorción

- Desinfección

- Otros

De lo anterior se puede observar que el tratamiento terciario hace referencia en la mayoría de casos a procesos de tratamiento fisicoquímicos y químicos; el tratamiento secundario hace referencia a los procesos de bioxidación (tratamiento de sólidos orgánicos disueltos en la mayoría de casos); el tratamiento primario a procesos físicos y químicos; y finalmente, el pretratamiento está ligado a procesos físicos.

2.1 PRETRATAMIENTO DE DESECHOS INDUSTRIALES.

Esta etapa se desarrolla en todos los casos (ya sea cuando los vertidos se manden a una planta municipal o a un río); de tal manera que en esta etapa, se acondicionan las aguas residuales para ser descargadas en alcantarillados públicos (cuando se mandan a una planta municipal); el pretratamiento o tratamiento preliminar de los desechos industriales, se desarrolla con una serie de procesos físicos que consisten principalmente en el cribado, la igualación y el mezclado.

2.1.1 CRIBADO.

Esta etapa de tratamiento, consiste principalmente en la remoción de los sólidos sedimentables y el material flotante que contienen las aguas residuales; para esto, por lo general se ocupan 3 tipos de equipo; rejillas, mallas y demenzadores; los que desarrollan la primera etapa del tratamiento preliminar eliminando los sólidos gruesos.

2.1.1.1 REJILLAS.

Resultan ser, un medio económico y efectivo de separación rápida de los sólidos gruesos en suspensión del resto de los vertidos, su característica depende de la forma en que efectuen su limpieza (ya sea manual o mecánica); su espaciamiento va de 1 a 2 pulgadas en manual y de 5/8 a 3 pulgadas en limpieza mecánica (las rejillas de limpieza manual, se emplean en pequeñas plantas); la velocidad de acercamiento del agua a la rejilla debe ser menor de 1.5 pies/seg.

Las rejillas de limpieza mecánica están generalmente patentadas (el ingeniero no las diseña, sino que selecciona el equipo deseado). Las rejillas deben instalarse por parejas (para que una opere, mientras que la otra está en limpieza o mantenimiento).

2.1.1.2 MALLAS.

Son empleadas para retener materiales de diferentes tamaños; generalmente sus aberturas son circulares, cuadradas o rectangulares. Las mallas gruesas tienen aberturas de 1/4 de pulgada o más y las finas tienen aberturas menores.

Las mallas finas son muy empleadas en plantas de tratamiento de desechos industriales y son de tipo disco o tambor (las aberturas en estos tipos de mallas son de 1/32 a 2/32 de pulgada de ancho, por 2 pulgadas de longitud).

Las mallas tienen una mayor efectividad de remoción que las rejillas, de 5 a 30 pies cúbicos / (millón de galones de agua tratada), lo que equivale generalmente del 5 al 15% de toda la materia suspendida en las aguas negras.

2.1.1.3 DESMENUZADORES.

Son instrumentos que cortan el material grueso retenido en una malla, sin removerlo de la corriente.

Hay varios modelos, el mas conocido consiste en un tambor vertical revolvente con malla de abertura de 1/4 de pulgada en máquinas pequeñas y 3/8 de pulgada en máquinas grandes (12).

2.1.2 IGUALACION Y PROPORCIONALIDAD.

Puesto que las plantas son diseñadas para flujos constantes, las variaciones de éstos influyen negativamente en la eficiencia de las plantas; de aquí que, la uniformización del flujo (igualación o regularización) y las concentraciones (homogeneización) se usen para corregir estas variaciones. De esta forma se retienen los vertidos en un tanque ("en línea" entre los desarenadores y el sedimentador primario si se usa como retén total o si se pretende que este depósito actúe como retén parcial del gasto, colocarlo "fuera de línea"), de tal forma que sus afluentes sean uniformes en sus características de pH, turbiedad, color, etc.

Para obtener esta uniformidad, a veces se inyecta aire a los depósitos obteniéndose una mejor mezcla, también se obtiene una bioxidación parcial (disminuyendo por esto la DBO), oxidaciones químicas, etc. Debe considerarse que el hecho de retener los vertidos, no es suficiente para igualarlos; cada vertido se debe mezclar adecuadamente con los otros.

Por otra parte, deben descargarse los vertidos industriales en proporción al caudal de las aguas residuales urbanas (proporcionalidad) en los colectores o en las corrientes de aguas receptoras (esto último se logra, construyendo un tanque de retención con una bomba de velocidad variable).

2.1.3 MEZCLADO.

Este proceso es empleado en diversos usos; cloración de efluentes de las plantas, acondicionamiento de lodos antes de los filtros de vacío, uniformización de la concentración de lodos, etc.

Existen actualmente, una gran variedad de métodos para lograr el mezclado (la mayoría aprovecha las condiciones de turbulencia creadas en las instalaciones hidráulicas de las plantas).

En el mezclado lento, se usan generalmente agitadores con paletas (con un tiempo de retención de 15 a 30 minutos).

En los mezcladores de todo tipo debe evitarse la formación de vórtices (esto se logra inclinando el agitador respecto a la vertical o bien colocando baffles en el tanque).

2.1.4 DESARENADORES.

Los tanques desarenadores tienen una doble función; (a) - remover la arena del agua residual y (b) separar la arena del material orgánico de tal forma que pueda ser desechable sin ocasionar molestias.

La cantidad de arenas removidas puede oscilar entre valores tan bajos como $2.5 \text{ m}^3/10^6 \text{ m}^3$ de aguas residuales; a valores tan altos como $176 \text{ m}^3/10^6 \text{ m}^3$ de aguas residuales. El contenido de humedad y de sólidos volátiles en las arenas varía también, dependiendo de las aguas residuales.

Hay 3 tipos básicos de cámaras desarenadoras:

a) De flujo horizontal. El agua residual pasa a la cámara -

en forma horizontal, la velocidad se controla por medio de la sección especial de un vertedor en el efluente.

b) Cámara aireada. Es un tanque de aireación con flujo en espiral.

c) Tanque de detritus. Son en realidad tanques de sedimentación, donde las arenas y los sólidos orgánicos pesados sedimentan indistintamente.

Generalmente deben usarse 2 o más cámaras en paralelo (cuando son las cámaras limpiadas manualmente se requieren cámaras múltiples). La operación con una sola cámara desarenadora es permisible cuando se cuenta con mecanismos de recolección de arenas.

La tubería de entrada en una cámara desarenadora debe localizarse al centro (ya que su eficiencia se afecta por la posición de ésta, sin embargo, no siempre pueden colocarse al centro las tuberías de entrada, sobre todo cuando hay 2 o más cámaras en paralelo).

Debe considerarse que el término "arena" incluye una serie de materiales tales como (cáscaras de huevo, pedazos de hueso, semillas, residuos de café molido, residuos orgánicos de comida, etc.).

Se recomienda lavar las arenas antes de su remoción y disposición (las arenas limpias se caracterizan por la ausencia de colores).

2.2 TRATAMIENTO PRIMARIO.

Después de hacerse el tratamiento preliminar; los vertidos reciben el tratamiento primario en la industria o en el caso, son mandados a una planta municipal para que en esta se realice el tratamiento primario. En esta etapa de tratamiento encontramos procesos químicos como la neutralización. Los procesos clásicos que se pueden observar en la figura (2.1) en el tratamiento primario son: la sedimentación primaria, la flotación y la neutralización. No obstante, la industria puede reducir el volumen de sus vertidos o la contaminación de éstos, antes de que los desechos industriales sufran un tratamiento primario.

En el primer caso (reducción de volumen), se puede lograr de varias formas, entre las más usuales tenemos: (a) separación de vertidos (estableciendo un conducto para cada vertido, así, en conductos diferentes mandar los residuos del proceso de fabricación; en otro conducto, las aguas de refrigeración y en otros los vertidos de uso sanitario); (b) reteniendo las aguas residuales (ahorrando toda el agua que sea posible); (c) reutilizando los vertidos industriales y urbanos como agua bruta (recomendable para zonas donde el agua es escasa, así estas aguas pueden ser utilizadas para refrigeración); etc. El objetivo principal en este caso, es reducir el volumen total de las aguas residuales, antes de su tratamiento.

Por otro lado, se puede buscar reducir los contaminantes antes de mandarlos a tratamiento; de esta forma existen diferentes métodos en que pueden evitarse la proliferación de éstos, así tenemos: (a) buscar cambios en el proceso (este método no radica en sí en buscar cambios en el flujo de procesos, sino más bien de buscar una opción en los reactivos empleados); (b) modificaciones en el equipo industrial (a veces se pueden hacer pequeños cambios en los equipos, para reducir los contami-

nantes en los vertidos, por ejemplo, colocar en éste rejillas para evitar la salida de plumas, semillas, etc.); (c) segregación de vertidos (segregar vertidos que llevan cianuros, cromo, etc. En este caso cabe mencionar que, no siempre en todos los casos es conveniente la separación de vertidos peligrosos o fuertes, a veces realizar una mezcla completa, resulta ser más ventajoso); (d) recuperación de subproductos (generalmente no resulta ser un proceso con ventajas económicas).

En resumidas cuentas, antes de efectuarse el tratamiento primario se puede intentar, reducir el volumen de los vertidos o disminuir la proliferación de contaminantes en éstos. Comoquiera que esto sea, resulta indispensable la realización del tratamiento primario el cual consiste, en el desarrollo de uno o varios de los siguientes procesos de tratamiento.

2.2.1 SEDIMENTACION.

La sedimentación, es una operación unitaria cuyo empleo principal es en la eliminación de sólidos en suspensión; se emplea principalmente en aguas residuales urbanas aunque también, en residuos industriales, los procesos de sedimentación pueden ser discretos (sedimentación libre), floculantes o de zona.

a) Sedimentación Libre. En ésta, las partículas mantienen su "individualidad", tamaño, forma y densidad. De acuerdo a la ley de Stokes, la velocidad de asentamiento de una partícula discreta y esférica está dada por:

$$V_t = \frac{D^2 (D_s - D_l) g}{18 \mu} \text{ - - - - - (2.1)}$$

Donde:

V_t = Velocidad de asentamiento (pies/seg.)

g = Aceleración de la gravedad (32.2 pies/seg²)

D_s = Densidad de la partícula (lb/pie³)

D_l = Densidad del líquido (lb/pie³)

D = Diámetro de partícula (pies)

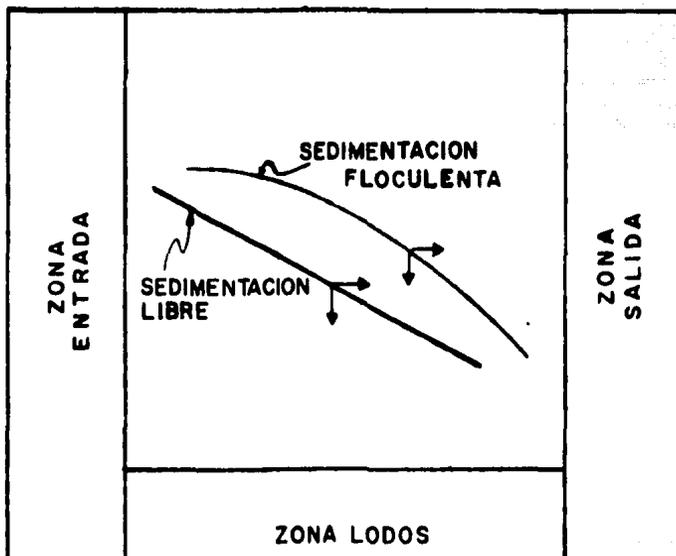
μ = Viscosidad (lb/pie-seg).

b) Sedimentación floculenta. En ésta, las partículas se aglomeran durante el periodo de sedimentación (va variando el tamaño y la velocidad de asentamiento de la partícula); la figura (2.2) contrasta la trayectoria recta de la sedimentación libre y la trayectoria curvilínea de la sedimentación floculenta.

La mayoría de los sólidos suspendidos provenientes de la industria, son de naturaleza floculenta. La sedimentación floculenta no se puede analizar matemáticamente, sino más bien, se requieren análisis de laboratorio.

c) Sedimentación de zona. En este tipo de sedimentación, una suspensión floculenta forma una estructura reticular que se sedimenta como una masa completa (se observa una interfase durante el proceso). Esta es característica en los lodos activados y de las suspensiones químicas floculentas, cuando la concentración de sólidos excede a 0.5 gr/lit.

Por experiencia sabemos que las velocidades reales de sedimentación pueden diferenciarse de los cálculos teóricos, - siendo las principales razones de esta variación, las turbulen



**CURVAS TÍPICAS PARA LA
SEDIMENTACION LIBRE Y
FLOCULENTA**

FIG. 2.2

cias y floculaciones. Las turbulencias pueden tener efectos positivos o negativos en las velocidades de sedimentación de las partículas. Entre los factores que producen las turbulencias tenemos el viento, la distribución desigual del caudal, cambios en la temperatura, cambios en la densidad del líquido a varias profundidades, etc.

Puesto que el principal objetivo de la sedimentación es producir la mayor concentración de sólidos posible, el peso de los lodos que se eliminan al final, es un factor de la mayor importancia en el tratamiento de los vertidos; estos sólidos se retiran continuamente del fondo del depósito tan pronto como se precipitan.

A los tanques de sedimentación primaria se les asigna la tarea de remover el grueso de los sólidos (estos tanques utilizan la fuerza de la gravedad). Los tanques de sedimentación se dividen en 4 zonas:

- (1) Zona de Entrada. Proporciona una transición suave (flujo estable) entre la zona de sedimentación y el gasto influente.
- (2) Zona de Salida. Proporciona una transición suave (flujo estable) de la zona de sedimentación y el gasto efluente.
- (3) Zona de Lodos. Recibe el material sedimentado y previene su interferencia con la sedimentación de las partículas.
- (4) Zona de Sedimentación. Proporciona el volumen del tanque requerido, para la sedimentación.

La mayor parte de los tanques de sedimentación, son de flujo

jo horizontal y pueden ser rectangulares o circulares en planta. Los tanques de sedimentación primaria, tienen generalmente periodos de retención de 60 a 120 minutos (aunque puedan tener hasta 5 horas) y remueven del 50 al 70% de los sólidos suspendidos en el influente, además, disminuyen de un 25 a un 40% de la DBO₅ (hay tanques con periodos de retención menores de los 60 minutos, con una remoción de sólidos suspendidos menor del 50%, estos son usados frecuentemente antes de las unidades de tratamiento biológico).

Los tanques circulares requieren menos trabajo, materiales y espacio que los tanques rectangulares, ya sea para mayores caudales o para cualquier tamaño de depósito; sin embargo, se obtiene menor rendimiento en estos debido a (1) longitud reducida de la zona efectiva de precipitación y (2) cortocircuitos (aguas residuales que salen del tanque antes del tiempo teórico de retención).

Las dimensiones comunes de los tanques de sedimentación son:

<u>TANQUE RECTANGULAR</u>	<u>INTERVALO DE TAMAÑO</u>	<u>TAMAÑO TIPICO</u>
Profundidad, m	3.0 - 5.0	3.6
Longitud, m	15.0 - 90.0	25.0 - 40.0
Anchura, m	3.0 - 24.0	6.0 - 10.0
Velocidad del desnatador (m/min)	0.6 - 1.2	1.0

<u>TANQUE CIRCULAR</u>	<u>INTERVALO DE TAMAÑO</u>	<u>TAMAÑO TIPICO</u>
Profundidad, m	3.0 - 5.0	4.5
Diámetro, m	36.0 - 60.0	12.0 - 45.0
Velocidad del desnatador (R/min)	0.02 - 0.05	0.03

2.2.2 FLOTACION.

La flotación es una operación unitaria, que se usa en lugar de la sedimentación para la remoción de sólidos suspendidos y flotantes (por este proceso pueden eliminarse también algunas sustancias coloidales y emulsionantes en materia flotante); así, las mismas condiciones que se aplican en la sedimentación de partículas, son válidas para materiales más ligeros que el agua.

Podemos encontrar flotación simple (en este caso los separadores de aceite son el mejor ejemplo) y flotación que se valga de burbujas de aire para que flote la materia sólida; de esta forma, la flotación se puede inducir por medio de aire (el aire se dispersa a presión dentro del líquido); podemos encontrar dos formas clásicas de flotación de burbujas de aire (1) flotación por aire disperso (se producen burbujas de aire por el movimiento mecánico de las turbinas, difusión del gas a través de medio poroso) y (2) flotación por aire disuelto (genera burbujas de aire por precipitación de una solución supersaturada de gas), así las burbujas de gas, producen la flotación de las partículas de acuerdo al principio de Arquímedes; los lodos que flotan se retiran continuamente y se eliminan del tanque por medio de bombas de lodos.

Los resultados característicos obtenidos de muestras de varios vertidos industriales (4) tratados por el sistema de flotación de aire disuelto, indica una reducción de sólidos en suspensión del 69 al 97.5% y una disminución de la DBO₅ del 60 al 91.8%; la temperatura de los vertidos industriales es un factor de suma importancia para la efectividad en los procesos de flotación (se pueden disolver casi dos veces la cantidad de aire a 0°C a 30°C); los depósitos de flotación son generalmen-

te mas pequeños que los de sedimentación.

Algunos autores (1) piensan que la flotación de aire se debe a:

- (1) La adhesión de una burbuja de gas a un líquido en suspensión o a una fase sólida.
- (2) Unión de las burbujas de gas en una estructura de flóculos al subir el gas.
- (3) Absorción y adsorción de las burbujas de gas en la estructura del flóculo.

2.2.3 NEUTRALIZACION.

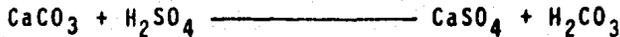
Resulta ser uno de los procesos de tratamiento mas importante, entre los tratamiento de la etapa primaria; si el vertido es descargado al alcantarillado público y sus ácidos o bases no son tratados, los daños al servicio público de alcantarillado serán muy costosos (corrosión de tuberías); también si estos vertidos son descargados en los ríos sin tratarse, los daños ocasionados a los peces o usuarios (ver capítulo 1) resultarán considerables.

Existen varios métodos para neutralizar los vertidos, entre estos los más importantes son (2):

- a) Para vertidos ácidos. Los vertidos ácidos antes de tratarse, pueden utilizarse para lavar, limpiar o neutralizar productos.

a.1) Tratamiento por carbonato cálcico. Es uno de los

métodos mas viejos de neutralización. La reacción representativa es la siguiente:



Una cantidad excesiva de ácido, precipitará el CaSO_4 y causará la inactividad del carbonato de calcio.

- a.2) Tratamiento con lechada de cal. La reacción es similar a las que se producen en los lechos de piedras calizas.

Aunque la lechada de cal actua lentamente, esta posee un poder altamente neutralizante (su poder se puede acelerar, calentando u oxigenando la mezcla).

- a.3) Tratamiento con sosa cáustica. Resulta ser un tratamiento muy costoso, puesto que el producto resultante de la reacción (Na^+) es soluble, no se incrementa la dureza de las aguas residuales (este método por su costo, solo es adecuado para pequeños volúmenes).

b) Para vertidos alcalinos.

- b.1) Utilización del gas de combustión. La inyección de gas de combustión en vertidos alcalinos, es un método relativamente nuevo y económico para neutralizar los; la mayor parte del trabajo experimental, ha sido llevado a cabo en los vertidos textiles; las reacciones representativas son:

2.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO.

El tratamiento secundario de las aguas residuales, está constituido principalmente por procesos de tratamiento biológicos; sin embargo, en los tratamientos secundarios podemos encontrar algún otro tipo de proceso que no sea biológico, como lo es la sedimentación secundaria.

El tratamiento secundario proporciona aguas con calidad adecuada para la mayoría de los cuerpos receptores. Los procesos comunes de tratamiento de esta etapa son: lodos activados, filtros percoladores, lagunas de oxidación, combustión húmeda, etc.

La mayoría de estos procesos de tratamiento, serán descritos con detalle en el capítulo 3; puesto que son los tratamientos que usaremos en nuestro estudio comparativo. Este tipo de proceso de tratamiento tiene su base en el fenómeno de biooxidación, que representa el mismo fenómeno que la estabilización -- aerobia de un rfo, mantenida y ajustada para acelerar el proceso y para controlarlo en el mejor grado posible.

2.4 TRATAMIENTO TERCARIO.

Esta etapa de tratamiento, es desarrollada generalmente cuando se requiere una mayor calidad de agua (cuando estas aguas por ejemplo, son usadas para el abastecimiento público), está constituido principalmente por procesos fisicoquímicos y químicos. De esta forma, el objetivo de esta etapa es la remoción de contaminantes que permanecen en el agua después de que ésta ha recibido un tratamiento secundario. Los contaminantes que generalmente quedan después de un tratamiento secundario y que son tratados en la etapa terciaria son: nutrientes como el N_2 y

el P; compuestos que causan color, olor y turbiedad; compuestos orgánicos que causan demanda de oxígeno; sales inorgánicas, metales pesados; etc.

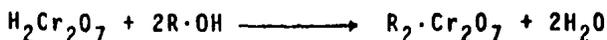
Los procesos de tratamiento terciario mas comunes son: Osmosis inversa, intercambio iónico, adsorción, absorción, diálisis, coagulación, etc.

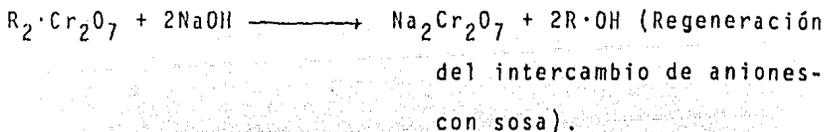
2.4.1 INTERCAMBIO IONICO.

Este proceso de tratamiento es empleado, para la eliminación de sólidos inorgánicos disueltos, aunque también se emplea para recuperar ciertos compuestos orgánicos ionizados - - (por ejemplo, la nicotina que se separa con agua con que se lavan los gases desprendidos durante el secado de cigarrillos y el ácido tartárico que se separa de los desechos de las vinaterías).

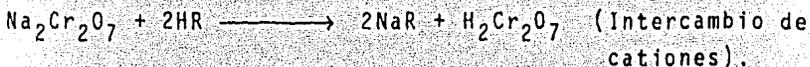
Es un proceso químico que básicamente consiste en el cambio de ciertos cationes y aniones indeseables de las aguas residuales por Na^+ , H_2 e iones de otro material llamado resina - (estos materiales son llamados comunmente zeolitas); al agotarse la zeolita, se lava a contracorriente para limpiar y regenerar el lecho con una solución de sal común que elimina el calcio y el magnesio en forma de cloruros y al mismo tiempo restaurar las zeolitas.

Uno de sus mayores usos, es en la recuperación de cromo - de los desechos industriales; así el agua de desecho que contiene ácido crómico, se hace pasar primero por un intercambiador de aniones para separar el cromo de la siguiente forma:

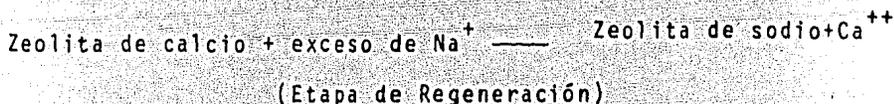




Si se desea recuperar:



En resumidas cuentas, tenemos dos procesos, el de suavizamiento y el de regeneración:



2.4.2 COAGULACION.

Representa un fenómeno fisicoquímico (acciones físicas y químicas combinadas), este proceso es muy empleado para la eliminación de sólidos coloidales (partículas mantenidas en suspensión a causa de su tamaño extremadamente pequeño; de 1 a 200 milimicrones; frecuentemente los coloides son responsables del color, turbiedad y DBO en ciertos vertidos industriales).

Los productos químicos que son usados comúnmente como coagulantes son: Sulfato de alumina $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O]$; Alumbre $[FeSO_4 \text{ ó } Fe_2(SO_4)_3]$; y cloruro férrico $(FeCl_3)$. Puesto que la adición de un coagulante altera el pH, hay que compensar.

Para lograr una coagulación efectiva, hay que dosificar el coagulante en forma continua y proporcionada (el coagulante debe dispersarse perfectamente dentro de las aguas que se tratarán, agitando levemente después de agregarse el coagulante).

La coagulación de vertidos de compuestos carbonosos, resulta ser efectiva con sulfatos de aluminio; mientras que los coagulantes de hierro, resultan mejores para vertidos con cantidades considerables de proteínas.

Existe además un proceso de coagulación por neutralización de las cargas eléctricas reduciendo el potencial de los coloides (el coloide en ocasiones se mantiene en suspensión no solo por su tamaño sino por su estado de hidratación y su carga eléctrica superficial; de tal manera que una corriente eléctrica que pase a través de un sistema coloidal hace que las partículas positivas vayan al cátodo y las negativas al ánodo).

Para aguas relativamente claras, se puede emplear como coagulantes; arcilla finamente dividida, sílice activado o bentonita.

2.4.3 ADSORCION Y ABSORCION.

Estos procesos fisicoquímicos son empleados para eliminar el color y los olores de las aguas residuales, absorbiendo y adsorbiendo los materiales orgánicos y coloidales de estas aguas.

En base a este proceso se forman precipitados floculantes de sedimentación más rápida (un ejemplo típico de esto, es la adsorción del silicio en el hidróxido de fierro). También sus pensiones coloidales tales como DDT, clorobenceno y clorobenc

no sulfónico pueden eliminarse por adsorción en carbón activado (el cual puede regenerarse por medio de vapor u otros gases). El principal uso de la propiedad adsorbente del carbón activado es en la decoloración del agua.

2.4.4 OSMOSIS INVERSA.

Este proceso de tratamiento, consiste en aplicar una presión suficiente a un fluido concentrado para vencer la presión osmótica y así, forzar a pasar el agua a través de una membrana semipermeable y de esta forma separar los sólidos disueltos del agua residual en la que estaban originalmente.

Este método a dado buenos resultados en la separación de iones tóxicos de los residuos procedentes de la electrodeposición.

Las membranas de acetato de celulosa han incrementado el rendimiento del proceso.

2.4.5 DIALISIS.

Este proceso es comúnmente usado, para la eliminación de sólidos disueltos inorgánicos; consiste en la separación de solutos a causa de su distinta difusión a través de membranas.

Actualmente son empleadas principalmente membranas de nitratos de celulosa y celofán; además se han introducido últimamente membranas resistentes a los ácidos, por lo que este proceso ha sido utilizado también para la recuperación del H_2SO_4 en la industria del cobre, acero inoxidable y otras.

La electrodiálisis (en términos concretos, resulta lo mis

mo que la diálisis, pero con la aplicación de la electricidad, se aumenta la fuerza de difusión). La electrodiálisis es una operación unitaria industrial cuya aplicación data desde 1915 (10), se ha empleado para separar los minerales de las mezclas y el agua. Este proceso resulta eficaz para la recuperación del HNO_3 y HF (de los líquidos de decapado de acero inoxidable y los líquidos procedentes del pulpado de mezclas orgánicas).

2.4.6 DESINFECCION.

Este proceso del tratamiento terciario es sumamente usado cuando a las aguas se les da un uso determinado (como en el caso de abastecimientos públicos); los agentes más comunes de esterilización y desinfección son:

- a) Cloro. Se diluye en las aguas en forma de gas o como hipoclorito, se puede agregar directo o en forma de solución acuosa (esta forma es más común); para grandes cantidades de agua se agrega el cloro en forma gaseosa y para pequeñas cantidades de agua en polvo de hipoclorito de calcio. Cuando los sistemas de recepción son abiertos (es decir, cuando reciben la luz del sol) se usa en forma de cloraminas. La cloración resulta ser el proceso de tratamiento más usado de todos (9) incluyendo la sedimentación.
- b) Ozono. Resulta ser un buen esterilizante. se produce al hacer pasar una descarga eléctrica a través de aire seco.
- c) Bromo. Es buen desinfectante, pero presenta el problema de que es difícil de dosificar.
- d) Rayos ultravioletas. Para que se obtengan resultados aceptables, se requieren aguas de suficiente transparencia.

e) Ioduro de plata. Es muy buen esterilizante, pero resulta ser muy caro.

2.4.7 OTROS.

Además de los procesos de tratamiento ya mencionados, - - existen otros que también son empleados; así el proceso de reacciones con agentes secuestrantes (consiste en el secuestro de impurezas, mediante la formación de complejos solubles) se llega a desarrollar en algunos lugares. Las desemulsificaciones (consiste en una ruptura de emulsiones por acidulación) también son empleadas. El proceso de exclusión de iones (permite la separación entre materiales iónico-no iónico, tal como NaCl-Alcohol, etc.). El proceso de retención de iones (desarrollo de una resina, cuyas partículas tienen puntos de intercambio - tanto aniónico como catiónico), etc. En resumidas cuentas, la mayoría de procesos de tratamiento terciario resultan ser un poco más sofisticados que los procesos de tratamiento de las otras etapas.

3. PROCESOS DE TRATAMIENTO PARA SOLIDOS ORGANICOS DISUELTOS (TRATAMIENTO SECUNDARIO).

La contaminación ocasionada por el material orgánico, produce generalmente un déficit de oxígeno en los sistemas de agua, ocasionando los efectos en estos sistemas ya por demás comentados en el primer capítulo; para eliminar este material, pueden emplearse procesos químicos o fisicoquímicos; sin embargo, los procesos biológicos resultan ser los más adecuados por la acción eficiente de las bacterias encargadas de degradar este material.

Estos procesos que fundamentalmente son bioquímicos, se caracterizan por ser procesos de degradación de la materia orgánica (a diferencia de los procesos físicos o fisicoquímicos, que eliminan el contaminante de las aguas residuales, pero en resumidas cuentas, prevalece el problema de su disposición final).

La característica esencial de estos procesos de tratamiento, es proporcionar a los microorganismos, mediante un diseño apropiado de los procesos, el medio ambiente adecuado para su desarrollo.

Las bacterias son las encargadas de eliminar estos desechos, sin embargo, también encontramos protozoarios que consumen a las bacterias como sustrato (actuando como pulidores de los efluentes), rotíferos, crustáceos, gusanos, larvas, etc.

Los procesos existentes actuales para el tratamiento de la materia orgánica son muchos, aunque algunos difieren poco entre sí (o más bien dicho, son variantes de un proceso principal). En el presente capítulo, se describirán cuatro procesos aeróbicos (tres de los cuales se consideran fundamentales en los pro-

cesos de eliminación de sólidos orgánicos disueltos) y el último, sistema "biodisco" por las características novedosas (hasta la fecha su patente no ha expirado) que presenta con respecto a los otros tres procesos. En este capítulo no se presentan los procesos anaeróbicos en el tratamiento de sólidos orgánicos, por considerar que su desarrollo y estudio, son lo suficientemente extensos para justificar otro trabajo.

3.1 LAGUNAS DE ESTABILIZACION.

Las lagunas de estabilización, resultan ser uno de los mas importantes procesos de tratamiento de material orgánico, debido a la economía que presentan tanto en su diseño y construcción, como en su mantenimiento y operación.

Estos son depósitos donde se retienen las aguas negras, - abiertas al aire y al sol, donde se degradan los residuos orgánicos contaminantes por medio de la acción mutua de algas y bacterias; se presentan aquí dos procesos biológicos, aerobio (en la superficie y anaerobio (en el fondo).

Las lagunas de estabilización fueron utilizadas inicialmente para la sedimentación de los sólidos suspendidos y para la - igualación de caudal, pero al cabo de algún tiempo se observó - que también se producía la oxidación del material orgánico, ocasionada por microorganismos aerobios en la superficie, anaerobios en el fondo, y los llamados microorganismos facultativos - en la zona intermedia (cabe mencionar que bajo las condiciones aeróbicas la oxidación de los vertidos alcanza su mayor eficacia).

Al desarrollarse continuamente la degradación de los desechos, se van formando los lodos sedimentados que están constituidos por material celular derivado de la fotosíntesis o por restos descompuestos de plantas, protozoarios y bacterias.

Además de las reacciones típicas de fotosíntesis y respiración en los procesos de degradación, se producen otras reacciones debido a los ciclos de nitrógeno, fósforo y azufre a partir de los cuales se producen compuestos como amoníaco, fosfatos y H_2S . En los procesos anaeróbicos se producen compuestos gaseo-

sos con enormes olores desagradables.

La energía producida en la oxidación, es aprovechada en la síntesis de compuestos complejos.

Sin considerar la acción de los compuestos inorgánicos, la reacción desarrollada en una laguna de oxidación puede representarse por:



Los lodos como producto de la remoción bioquímica de materia orgánica acompañan a los sustratos producidos en la síntesis de carbohidratos, alcoholes, aminoácidos y ácidos orgánicos.

El aprovechamiento de los cultivos de algas en las lagunas es importante, puesto que éstas requieren de CO_2 para realizar su fotosíntesis, produciendo por consecuencia el O_2 necesario para la degradación de las aguas residuales; el ciclo consta de lo siguiente:

1. Los microorganismos requieren del O_2 para oxidar las aguas residuales por lo que consumen el O_2 disuelto en ésta.
2. Estos microorganismos al oxidar las aguas residuales, producen CO_2 (ver reacción anterior), H_2O , nitratos, sulfatos y fosfatos.
3. Estos materiales producidos son utilizados por las algas para la elaboración de la fotosíntesis.
4. De la fotosíntesis se produce el oxígeno disuelto neces-

rio para la degradación de los materiales orgánicos.

De lo anterior, se puede ver que la función de las algas es muy importante, puesto que completan el ciclo natural de los organismos en las lagunas (puede haber problemas en estos sistemas cuando hace mucho frío y/o cuando las algas mueren, puesto que producirán una carga secundaria).

Las algas pueden ser verdes (Chlamydomonas, Chlorella, Eublena, Micractinium y Scenedesmus) o verde azules (Anabaena, Oscillatoria y Phormidium); éstas fijan el carbono del CO_2 y originan el O_2 libre.

Al producirse CO_2 por las bacterias, tiende a bajar el pH, pero al utilizarlo las algas, ocasionan que el pH aumente por lo que se desarrolla un equilibrio entre la actividad bacteriana y la ocasionada por las algas.

Las lagunas de estabilización se clasifican de acuerdo a sus características, generalmente de cuatro formas:

1. Lagunas facultativas. Se caracterizan porque en ellas se desarrolla tanto la degradación aeróbica (en la superficie) y la degradación anaeróbica en el fondo, como una degradación intermedia con microorganismos facultativos; éstas operan con cargas orgánicas medias.
2. Lagunas anaeróbicas. En éstas la degradación se desarrolla sin la presencia de O_2 , opera con bajas cargas orgánicas y por sus características anaeróbicas presenta una producción de malos olores.
3. Lagunas aeróbicas. Puesto que en estas lagunas la degrada

ción se desarrolla con presencia del O_2 producido por la fotosíntesis o por la transferencia del gas en la superficie, son de poca profundidad, por lo que sus cargas orgánicas son bajas.

4. Lagunas de maduración. Son consideradas generalmente para reducir las bacterias del efluente.

De las anteriores, las lagunas facultativas, son las de uso más común en el mundo, son aeróbicas mientras hay sol y algunas horas de la noche y las horas restantes se presentan con condiciones anaeróbicas en el fondo; los lodos presentan condiciones anaeróbicas unos milímetros más abajo de la interfase sólido-líquido; la figura (3.1) representa esquemáticamente la actividad en una laguna de estabilización.

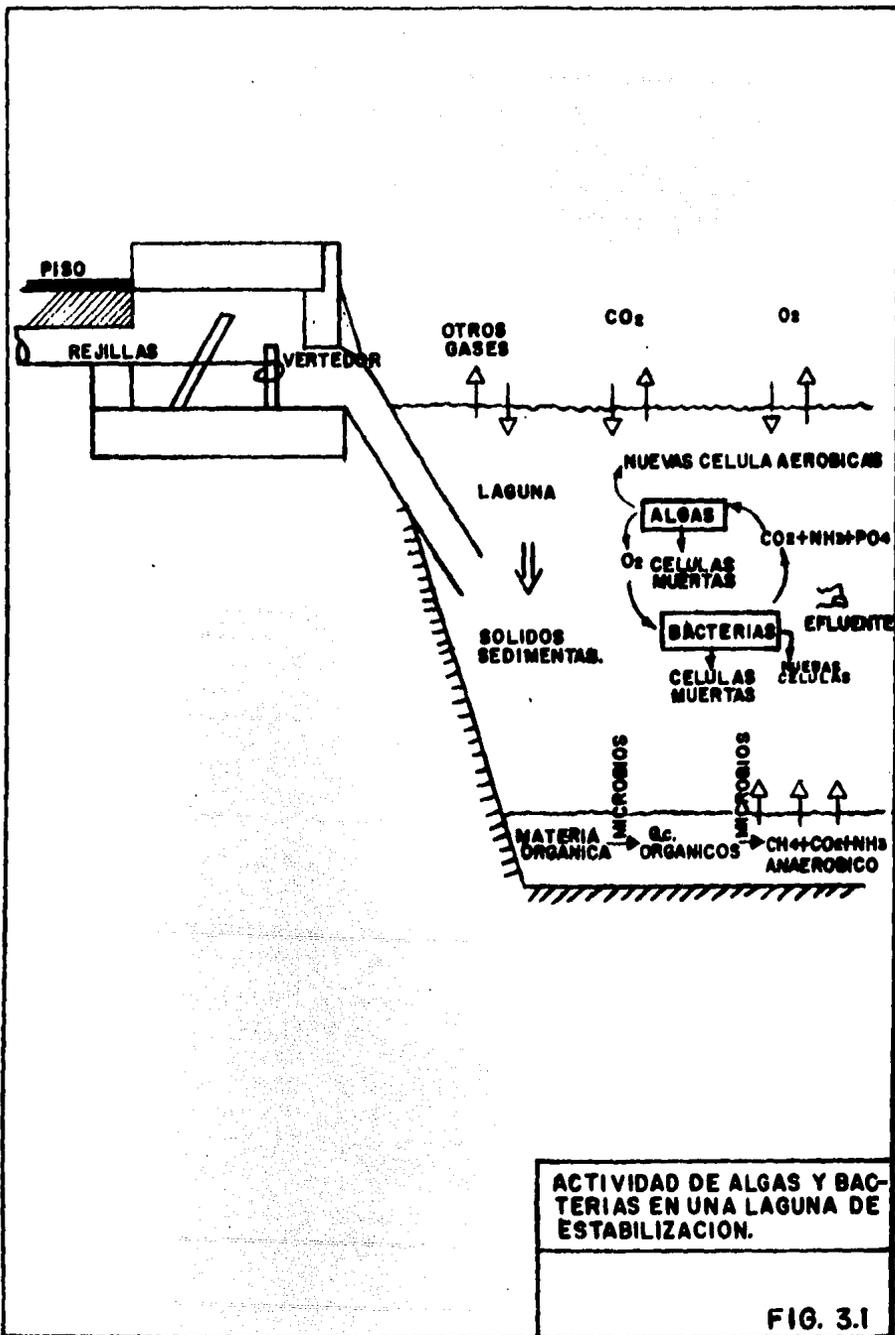
En ocasiones deberán agregarse nutrientes a las lagunas - (tales como sales minerales), para acelerar la actividad biológica.

La tasa de crecimiento de bacterias es de 0.05 a 0.7 por día; los factores que afectan el ecosistema de las lagunas son el O_2 , CO_2 , H_2O , nutrientes y componentes bióticos tales como algas, bacterias, protozoarios, etc.

Los parámetros que intervienen en el proceso de degradación pueden ser físicos, químicos y biológicos.

1. Factores físicos:

- 1.a) Temperatura. Como ya se sabe, la temperatura influye en el oxígeno disuelto en la laguna, en las velocidades de reacción química y bioquímica (ge-



ACTIVIDAD DE ALGAS Y BACTERIAS EN UNA LAGUNA DE ESTABILIZACION.

FIG. 3.1

neralmente la rapidez de las reacciones químicas - se duplican por cada 10°C de aumento de la temperatura); su relación con el tiempo requerido para la reacción estará expresado por la ecuación (Hoff - Arrhenius).

$$t/t_0 = \theta (T_0 - T) \text{ - - - - - (3.1)}$$

Donde:

t = tiempo requerido para la reacción a una temperatura T .

t_0 = tiempo inicial de reacción.

T_0 = temperatura inicial

θ = coeficiente de reacción; $\theta = 1.085$ (para aguas residuales domésticas).

Para una reacción bioquímica podemos usar:

$$\frac{K_{35}}{K_T} = \frac{t_T}{t_{35}} = \theta (35 - T) \text{ - - - - - (3.2)}$$

Donde:

K_{35} y K_T = valores de la constante de velocidad de degradación en la reacción bacteriana a 35°C y a temperatura T .

t_{35} y t_T = tiempos de retención a temperatura de 35°C y a temperatura T respectivamente de aguas residuales.

Algunos valores de K son:

Tabla (3.1)

(°C) temp.	K_T (1/día)
5	0.103
10	0.12
15	0.24
20	0.35
25	0.53
30	0.80
35	1.20

A temperaturas mayores de 35°C, se pueden presentar efectos nocivos tales como, proliferación de algas verde azules; mientras que, a temperaturas inferiores a 4°C la actividad de algas y bacterias se hace insignificante.

Los efectos de la temperatura sobre la eficiencia se resumen como:

- a) Las variaciones de la temperatura afectan la eliminación de la DBO (la variación de temperatura en un proceso de depuración debe estar entre 4 y 35°C).
- b) Dentro de ciertos límites, esta eliminación de la DBO aumenta con la temperatura.
- c) Los cambios biológicos debidos a las variaciones de temperatura afectan al pH, color, sólidos en suspensión, transmisión de luz, a las especies predominantes de algas y a los microorganismos presentes.

Además la diferencia de temperaturas, ocasiona una diferencia de densidades, dando como resultado el desarrollo de un mezclado.

1.b) Insolación. El efecto principal de este parámetro es sobre el proceso fotosintético de las algas; se ha determinado que son necesarias $0.6 \text{ cal/cm}^2 \text{ día}$ de radiación visible para cada Kg de DBO/Ha día re movidos.

El intervalo de utilización de la luz solar va del 2 al 9%, siendo el 5% un valor común, además debe considerarse que la radiación visible que puede pe netrar la superficie del agua, está limitada en su longitud de onda de 4000 a 7000 Å. La expresión - representativa de este parámetro es (18):

$$I = I_0 \exp(-k c d) \quad (3.3)$$

Donde:

I_0 = intensidad luminosa en la superficie líquida.

I = intensidad de la luz después de atravesar la lámina líquida.

c = concentración de algas.

k = coeficiente de absorción luminosa.

d = espesor de la capa líquida.

La energía luminosa utilizada en la fotosíntesis es:

$$f = \frac{I_s}{I_0} [L_m (I_0/I_s) + 1] \text{ - - - - - (3.3.1)}$$

Donde:

f = fracción de la energía luminosa utilizada en la fotosíntesis.

I_s = intensidad de saturación de la luz, para las algas predominantes en la lámina líquida con siderada.

1.c) Ph. Generalmente el pH de las lagunas está sujeto a variaciones (esto se debe principalmente a la producción y consumo de CO₂ en la respiración y fotosíntesis respectivamente). Generalmente cuando la energía luminosa suministrada es menor de 13 -- Cal/cm² día el valor máximo detectado para el pH es de 8, cuando la energía luminosa es mayor de 178 cal/cm² día se encuentra el pH hasta un límite de 11.2; en las lagunas aeróbicas la gama de variación diaria de pH está comprendida entre 7.5 y 10.5. Ya se ha comentado, que el desarrollo de la actividad biológica está muy relacionado con el pH; las bacterias aeróbicas se desarrollan dentro de una variación de pH comprendida entre 7 y 9; el proceso de la fotosíntesis requiere un pH de 6.5 a 10.5, mientras que las bacterias facultativas lo requieren de 4.5 a 7.5; se ha encontrado un descenso de valores de pH para DBO crecientes. Además, si el pH se mantiene alcalino en todo el fondo, -- puede considerarse que el proceso se mantuvo aerobio durante ese tiempo.

V_w = presión de vapor del agua a la temperatura del H_2O en mmHg.

V_h = humedad relativa %

V = velocidad del viento (Km/hr)

Con algunos parámetros anteriores, podemos desarrollar el equilibrio hidráulico, el cual estará definido por el caudal de entrada (Q_i), la evaporación (E), la precipitación (P) y la infiltración (F); por lo que el caudal del efluente (Q_e) estará dado por:

$$Q_e = (Q_i + P) - (E + F) \quad (3.5)$$

Logicamente encontramos fluctuaciones en los valores de esta ecuación; si ocurriese un valor negativo durante un largo periodo de tiempo, la laguna llega a tener un nivel tan bajo que la hace inútil y no cumple con lo estipulado en el diseño.

2. Factores químicos:

- 2.a) Elementos y compuestos nutrientes. CO_2 libre (usado por las algas); N_2 , P, S, K, Mg, y Ca. También se consideran trazas de Fe, Mn, Si, Zn, Cu, Co, Mo, B y V.

Los residuos líquidos domésticos son ricos en elementos nutritivos para las bacterias, en cambio los residuos industriales no.

2.b) Oxígeno disuelto (OD). Como ya se comentó, en las capas superiores de las lagunas de estabilización la degradación de la materia orgánica es producida por las bacterias aeróbicas, cuyo oxígeno no puede ser suministrado por:

- I) Reaereación atmosférica,
- II) Oxígeno producido por algas (fotosíntesis).

Generalmente el equilibrio (respiración-fotosíntesis) no se lleva a cabo, ya que la razón de producción de O_2 por las algas es muy superior al consumo de O_2 , por lo que en aguas que contienen suficientes algas verdes hay sobresaturación de O_2 .

La producción de O_2 por las algas de una laguna está relacionada con la cantidad de luz que incide en ésta, su forma matemática (Oswald, 1963) está dada por (18):

$$O_2 = 0.25 F I_1 \text{ --- (3.6)}$$

Donde:

F = eficiencia de conversión de la luz (29)%

I_1 = intensidad de la luz.

Para la determinación del OD a distintos niveles de profundidad se utiliza un equipo polarimétrico (por ejemplo al medidor de oxígeno ysi).

A este respecto, cabe mencionar que los valores máximos de OD se encuentran con mayor frecuencia en la superficie, hasta 30 ó 50cm de profundidad, aunque a profundidades mayores se detectan aun cantidades de OD.

Generalmente en las lagunas se pueden considerar tres niveles de profundidad de (0-50)cm; (50-113) cm y de (113-200)cm.

Además deben considerarse otros factores químicos como la DBO, los contaminantes resistentes al desdoblamiento, etc.

3. Factores biológicos:

Son los factores influyentes en la fotosíntesis y degradación, tales como algas y bacterias.

Es importante comentar que las aguas residuales permanecen un cierto tiempo en las lagunas, este tiempo de retención, R, está definido por:

$$R = V/Q \text{ --- (3.7)}$$

Donde:

V = volúmen de la laguna.

Q = flujo medio diario del influente.

Generalmente el tiempo de retención para una laguna de esta bilización convencional (facultativa sin aereación) es de

7 a 30 días, sin embargo pueden tener tiempos de retención menores (la retención mínima va de 2 a 2.5 días).

DISEÑO DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACION.

El diseño de las lagunas facultativas y las anaeróbicas - están basadas en modelos matemáticos desarrollados mas bien em píricamente. Sin embargo la aplicabilidad de éstos es bastante común y presenta un aceptable grado de confiabilidad; las - ecuaciones mas representativas en el caso de las lagunas facu_ltativas son:

$$DBO_e = \frac{DBO_i}{K_T R_T + 1} \quad \text{--- (3.8)}$$

Donde:

DBO_e - DBO_i ; DBO_5 en el efluente y el influente respectivamente, (mg/lt).

Las variables K_T y R_T ya fueron definidas anteriormente.

La eficiencia de la laguna (E) estará dada por:

$$E = \frac{DBO_i - DBO_e}{DBO_i} * 100 \quad \text{--- (3.9)}$$

La DBO_e también puede calcularse en función de la profundidad (d), o aprovechar el valor de la DBO_e para conocer la profundidad.

$$DBO_e = \frac{600}{0.18 d + 8} \quad \text{--- (3.10)}$$

d = profundidad (metros).

La profundidad de las lagunas facultativas es generalmente de 1.5 a 1.8 mt. lo que permite el desarrollo de la estratificación térmica.

El volumen de la laguna, se puede calcular con el criterio (empírico) elaborado por Hermann y Gloyna (que hace especial atención a la temperatura y al tiempo de retención para una reducción de la DBO), (18);

$$V = 3.5 Q \text{ DBO}_1 \theta^{(35 - T_m)} \quad (3.11)$$

Donde:

V = volumen (m^3)

θ = coeficiente de reacción por la temperatura, (1.085).

T_m = temperatura media del agua en el mes mas frío.

A partir de esta ecuación se puede elaborar un gráfico para el cálculo de volúmenes a diferentes temperaturas y es empleado para aguas residuales de composición normal (para elevados valores de DBO o cuando se tienen sustancias tóxicas, se requieren considerar mayores volúmenes). Aunque en el volumen de diseño debiera considerarse la intensidad de la luz, la infiltración, los sólidos disueltos, etc. En realidad resulta la temperatura el factor de mayor importancia.

Puede considerarse, que las lagunas facultativas tienen dos procesos; el de oxigenación por fotosíntesis y el de fermentación con producción de CH_4 . La máxima oxidación bacteriana

El pH adecuado para este proceso va de 6.8 a 7.2; la acción bacteriana se inhibe con valores de pH inferiores a 5.5.

Las lagunas anaerobias profundas presentan las siguientes ventajas:

- a) Al tener menor superficie por unidad de volúmen permiten una utilización mejor del terreno.
- b) Presentan mayor protección contra los cambios ambientales bruscos y del oxígeno disuelto.
- c) Tienen una zona mas compacta de lodo.

Para obtener condiciones anaerobias la carga orgánica puede variar de 246 a 672 Kg/Ha días (la carga orgánica implica el volúmen y la polución aplicadas, donde las cargas de polución comprenden a contaminantes físicos, químicos y biológicos).

La degradación de la materia orgánica se puede expresar así:



Y el modelo matemático representativo es:

$$DBO_e = \frac{DBO_i}{K_m \left[\frac{DBO_e}{DBO_i} \right]^n R + 1} \quad \text{--- (3.13)}$$

Donde:

K_m = constante de remoción de la DBO (6.0)

n = exponente que determina experimentalmente

R = tiempo de retención con mezcla completa.

Algunas características de diseño de estas lagunas son:

-) Tiempo de retención del líquido (aproximadamente de 3 a 5 días) .
-) Profundidad de 3 a 4.5 mt.
-) Carga volumétrica de 0.19 a 0.40 Kg/m³ de DBO
-) Carga superficial de 448 a 672 Kg/Ha dfa de DBO

Aunque a lo anterior, hay que agregar que remociones de un 70% de la DBO se han obtenido con profundidades de 1.2 mt y de retención de un solo dfa, las recomendaciones comunes son (12):

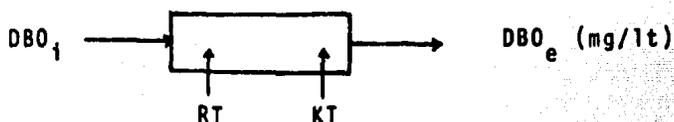
AUTOR	PROFUNDIDAD (mt)	TIEMPO DE RETENCION (dfas)	
Parker	0.90 - 1.20	12	Para re mociones de DBO del 75%
Cooper	1.20 - 2.40	15 a 160	
Oswald	2.40 - 3.65	20 a 30	

(TABLA 3.2)

Generalmente los malos olores en las lagunas de estabilización se deben a superficies insuficientes, temperaturas altas, insuficiente profundidad de la masa líquida, distribución desigual de los sólidos sedimentables, etc. Esto último se puede corregir mediante la construcción de varias entradas del influente a la laguna para lograr una mejor distribución de los sólidos sedimentables.

Puede resumirse que las lagunas de estabilización son un tipo de planta cuyo nivel de tratamiento se puede clasificar como secundario, donde el objetivo esencial del proceso es la eliminación de los sólidos suspendidos totales, disminución de la DBO y la digestión de lodos; para desarrollar este proceso no se requiere de ningún tratamiento antecedente (aunque ya se mencionó, en el caso de las lagunas anaeróbicas, éstas pueden actuar como un pretratamiento para lagunas facultativas); en concreto, los pasos a seguir en su diseño son:

1. Obtención de la calidad del efluente



RT = periodo de retención a temperatura (T)

KT = velocidad de descomposición a temperatura (T)

a)
$$DBO_e = \frac{DBO_1}{K_T R_T + 1}$$

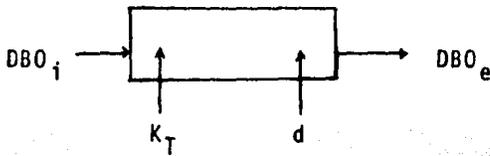
Donde:

$$\frac{K_{35}}{K_T} = \theta (35 - T) = \frac{RT}{R_{35}}$$

$$\theta = 1.085 \quad 7 \leq R \leq 30$$

RT = tiempo de retención y puede calcularse con el volúmen y Q.

b) Otra forma para calcular la calidad del efluente:



Donde:

d = profundidad

$$DBO_e = \frac{600}{0.18 d + 8} \quad DBO_e = \frac{DBO_i}{0.17 RT + 1}$$

2. Obtención del volúmen.



$$V = 3.5Q DBO_i \theta \exp(35 - T_m) \quad (m^3)$$

T_m = temperatura medio del mes más frío

Q = carga orgánica.

3. Eficiencia.



$$E = \frac{DBO_i - DBO_e}{DBO_i} \times 100$$

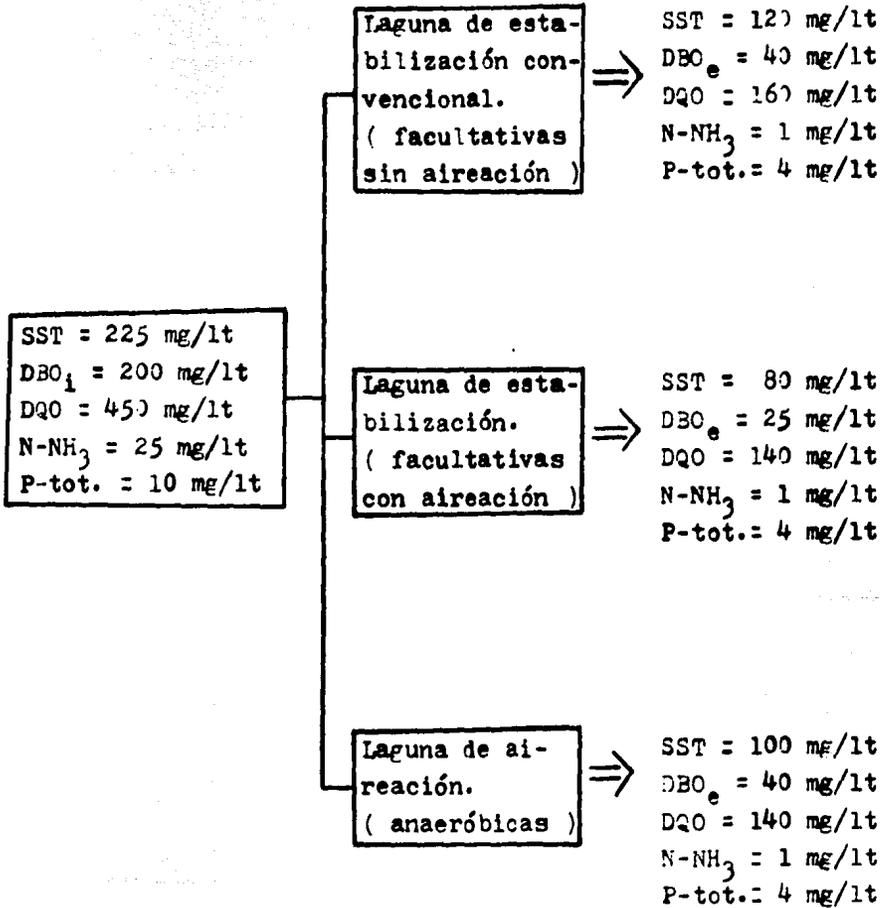
Otros factores integrantes del diseño de las lagunas de estabilización son:

- a) Selección del sitio. Se recomienda que esté a 800 mt. de la comunidad más cercana; que en el lugar, el viento fluya libremente y que el terreno sea el adecuado (que no haya infiltraciones a mantos secundarios, y si los hay, revestir con arcilla de 40 cm de espesor).
- b) Forma de la laguna y fondo. Se deben evitar la formación de penínsulas o golfos (ya que la materia se puede acumular aquí) y procurar que el fondo tenga uniformidad.
- c) Diques. Sirvan para transitar alrededor de la laguna, - manteniéndola libre y limpia de hierba en las orillas, su altura debe tener por lo menos 0.7 mt. sobre el nivel del agua, teniendo cuidado de no perjudicar la acción del - viento.
- d) Estructura de entrada. La tubería debe descargar en el - centro de la laguna si ésta es pequeña y a 15 mt. de la - orilla si ésta es grande.
- e) Estructura de salida. Debe estar cerca de las orillas y - lo más lejos posible de la entrada del influente, para - evitar la formación de corto circuitos.

Se pueden usar varias lagunas como parte de un mismo sistema. Cuando el sistema es en paralelo, la operación se puede empezar en una laguna pequeña y cuando operan en serie prácticamente todos los sólidos sedimentables, se depositan en la primera laguna.

Generalmente en las lagunas de estabilización la disminución de la DBO resulta ser bastante variable, va generalmente de 10 al 90%.

Las eficiencias de diversos sistemas de tratamiento de -
 aguas residuales en condiciones ideales de operación se puede-
 expresar mediante los siguientes datos:



Debe considerarse que en los datos anteriores, se representan condiciones ideales de operación. Las siguientes tablas, representan valores reales, obtenidos en lagunas experimentales de C.U. y que ilustran de manera clara y concisa, los cambios de la DBO, del oxígeno disuelto, pH, eficiencia, etc.

Las siguientes cinco tablas representan un extracto de aproximadamente cien tablas de valores experimentales obtenidos de (18). Las características de estas lagunas son las siguientes:

- Los depósitos son de mampostería de piedra con aplanado interior de mortero de cemento para impermeabilizarlos; son dos cámaras colocadas en serie de 62.8 m^3 de capacidad cada una. Los muestreos se realizaron a lo largo de las lagunas (en el centro, orillas, diversas profundidades, etc.), la profundidad es de 2m.
- El proceso se inició llenando las lagunas con aguas limpias (el agua permanece cristalina por algún tiempo, aproximadamente entre 15 y 30 días, luego adquiere un color verdoso).
- Después de pasado este tiempo se procede a bombear el influente (aguas negras) para que empiece la degradación. Nótese que en la segunda laguna, a veces aumenta la DBO lo que indica "By Passing" en las lagunas.

TABLA 3.3

Año	Precipit. (en mm)	Evaporac. (mm)	Insolación promedio hr.	Radiación (Cal/cm día)
1967	73.75	160.48	7.53	464
1968	77.97	163.79	7.77	424

TABLA 3.4

LAGUNA DE OXIDACION (1)

Mes (promedio)	D50 mg/lit		T (°C)		O.D		Ph	
	inf.	efluen.	sup.	fondo	sup.	fondo	sup.	fondo
Febrero (67)	148	16.2	16	14	7.47	3.21	--	--
Marzo	142	26.1	15.8	15.8	3.86	4.02	9.1	8.8
Abril	142	31.0	18	17	4.05	0.38	3.9	8.7
Agosto	53.4	12.9	--	--	10.8	0.98	8.2	7.1
Septiembre	40.2	15.2	22	19	17.7	4.11	3.85	3.3
Octubre	52.5	18.3	21.5	19	22.1	5.8	8.43	7.9
Noviembre	97.3	24.6	17	16	9.35	2.93	8.07	7.5
Diciembre	85.3	31.8	17	14	21.8	1.72	3.25	7.65
Enero (63)	245	53	13.5	11.5	17.3	2.60	9.4	7.75
Febrero	124.9	47.1	---	14.6	18.5	3.45	7.1	7.7
Marzo	133.4	51	16.4	16.4	5.21	0.116	8.47	8.1
Abril	129.9	46.8	18.6	---	4.75	0.133	8.25	7.75
Mayo	135.7	60.7	19.7	19.7	6.5	0.0	8.15	7.22
Junio	--	--	21.2	21.2	10.7	0.04	8.75	8.3

LAGUNA DE OXIDACION (2)

TABLA 3.5

-Mes (promedio)	DBO mg/lit		T (°C)	O.D		Fh	
	inf.	efluen.		sup.	fondo	sup.	fondo
Febrero (67)	16.2	6.6	14.7	20.5	14.7	--	--
Marzo	26.1	12.6	15.7	12.2	5.32	9.17	9.12
Abril	31.0	13.8	17.3	3.54	0.51	3.5	3.6
Agosto	12.9	23.2	--	19.4	0.1	9.6	3.8
Septiembre	15.2	19.9	24.4	12.8	0.52	9.0	3.7
Octubre	13.7	21.2	19.92	19.7	3.37	3.9	8.5
Noviembre	24.6	26.9	16.6	18.5	4.68	8.6	8.26
Diciembre	31.8	32.2	16.1	18	0.33	3.5	8.1
Enero (68)	53	40.7	12.7	19.6	4.3	8.3	8.3
Febrero	47.1	31.9	15.9	1.6	3.89	8.4	7.9
Marzo	51	38	16.2	13.4	7.41	9.12	3.58
Abril	46.8	31.2	19.3	7.47	0.07	8.72	7.75
Mayo	60.7	34.3	19.66	14.92	0.0	8.9	7.6
Junio	--	--	21.2	13.3	0.15	9.3	3.5

TABLA 3.6

DETERMINACION DE SOLIDOS

Fecha	Procedencia muestra	Sól. tot.	Sól. tot. fijos	Sól. tot. volat.	Sól. tot. susp.	Sól. susp. fijos	Sól. susp. volat.
13/III	inf. laguna 1	1208	352	856	934	127	807
" "	inf. laguna 2	470	280	190	90	6	84
" "	efl. laguna 2	348	198	150	22	8	14
17/X	inf. laguna 1	398	252	146	44	16	28
" "	inf. laguna 2	396	214	182	60	13	44
" "	efl. laguna 2	460	286	174	58	18	40
28/XI	inf. laguna 1	480	336	144	132	26	106
" "	inf. laguna 2	572	364	208	98	12	86
" "	efl. laguna 2	534	330	204	64	8	56

TABLA 3.7

PROMEDIO MENSUAL DE LAS DETERMINACIONES PARA AMBAS LAGUNAS

CONCEPTO	UNIDAD	ABRIL 1967		AGOSTO 1967		DIC. 1967	
		LAG (1)	LAG (2)	LAG (1)	LAG (2)	LAG (1)	(2)
DBO influente	mg/lt	142	31	53.4	12.9	35.3	31.8
DBO efluente	mg/lt	31	13.8	12.9	25.2	31.8	32.2
η individual	%	78.2	55.5	75.8	negat.	62.9	neg.
η conjunta	%	90.3	90.3	47.2	47.2	62.5	62.5
Vol. medio/día	m ³ /día	2.66	2.66	0.823	0.823	0.92	0.92
Carga org. medi.	kg/HA-d	77.4	16.8	8.7	2.38	17.3	6.41
Tiempo retenc.	día (d)	23.6	23.6	75.9	75.9	66.1	66.1
T media amb.	°C	18.6	18.6	15.3	15.3	----	----
T media agua	°C	17.3	17.3	----	----	16.1	16.1
O.D superficie	mg/lt	4.25	3.64	10.8	19.4	21.3	18.0
O.D fondo	mg/lt	0.38	0.51	0.98	0.1	1.72	0.98
Ph influente	---	7.72	8.7	----	----	7.7	8.88
Ph efluente	---	8.7	8.97	----	----	8.88	9.4
Ph superficie	---	8.9	8.5	8.2	9.6	8.25	8.5
Ph fondo	--	8.7	8.6	7.1	8.8	7.65	8.1
Sól. tot. infl.	mg/lt	830	585.3	----	----	----	----
Sól. tot. efl.	mg/lt	585.3	657.3	----	----	----	----
η en remoción	%	29.5	0.0	----	----	----	----
Sól. susp infl.	mg/lt	432	112	----	----	----	----
Sól. susp. efl.	mg/lt	112	102.7	----	----	----	----

Los costos absolutos del proceso, sin considerar los costos de terreno para diferentes trenes de proceso de tratamiento de aguas residuales para lagunas de estabilización son: (valor hasta Mayo. de 1983) (12).

	-costo construcción	\$ 521,730 U.S.
1. Para 1 millón de Gal/día	-costo operación y mantenimiento anual	46,843 U.S.
	-costo construcción	2'608,653 U.S.
2. Para 10 millones de Gal/día	-costo operación y mantenimiento anual	237,536 U.S.

El manejo adecuado de los lodos, su transporte y disposición en el suelo, comprende cerca del 35% del costo total de la inversión y aproximadamente el 55% de los costos anuales de operación y mantenimiento.

Hay que considerar que la superficie en hectáreas de las lagunas de estabilización depende de la carga Q. Así para 1 millón de Gal/día es de 5.8 Ha y para 10 millones de galones por día 20.2 Ha.

Las aplicaciones en la industria, de las lagunas de estabilización resulta ser muy flexible, pero limitada en cierta medida. Por el espacio que utilizan, este proceso de tratamiento es empleado en la industria textil (principalmente por la gran cantidad de materia orgánica existente, para evitar malos olores); curtidurías (se usan las lagunas como proceso secundario); industria de alimentos (las lagunas se emplean después de la sedimentación, se usa NaNO_3 para evitar malos olores); industria de leche y sus productos derivados; industria de pulpa y papel (se emplean para el tratamiento de residuos con propósitos de almacenamiento, sedimentación, homogeneización y para la degradación de materia orgánica); industria de aceite y petróleo, etc.

Como ya se ha comentado, las lagunas facultativas son el proceso de tratamiento mas usado en el mundo, por su economía y sencillez en el mantenimiento, su uso se ha extendido en - - gran parte en Sudáfrica y en el centro de Africa donde se han llevado a cabo varias investigaciones al respecto.

En México, hacia 1982 existían 79 instalaciones de este - tipo, lo cual constituye el 27.7% de aguas tratadas en el país; sin embargo, la organización para su administración, operación y mantenimiento resulta inadecuada (19); la mayoría se han diseñado sin considerar normas específicas de calidad en el - - efluente.

La sencillez teconógica de este proceso, hace imprescindible su consideración en los municipios de nuestro país, sobre todo por la marcada tendencia a controlar los sólidos suspendidos totales y la DBO.

3.2 PROCESO DE LODOS ACTIVADOS.

Este proceso de tratamiento consiste en la estabilización de aguas residuales, mediante una masa de microorganismos capaces de degradar biológicamente los desechos. Esto significa la creación artificial de un medio ambiente adecuado, para el desarrollo de un sistema ecológico, para considerar a los desechos como el sustrato de los microorganismos, es decir, como parte de los nutrientes de éstos.

Este proceso tuvo su inicio a principios de este siglo y actualmente está considerado como uno de los procesos más confiables de los habidos para el tratamiento de los desechos orgánicos. Los microorganismos que actúan sobre los desechos pueden ser aeróbicos o anaeróbicos, sin embargo casi todos resultan ser aeróbicos, por lo que se requiere en este proceso una aireación adecuada para que los microorganismos lleven a cabo sus funciones metabólicas; de aquí que el proceso esté definido por dos etapas una de aireación y otra de separación.

La figura (3.2) de la siguiente hoja representa las características de este proceso de tratamiento.

En ésta puede verse, que los desechos son alimentados al tanque aireado donde los microorganismos metabolizan y flocculan biológicamente los compuestos orgánicos; en el proceso, parte del desecho orgánico se convierte en nuevos microorganismos (síntesis) y la otra parte se oxida (por medio de enzimas dando productos finales simples tales como CO_2 , H_2O y NO_3).

A la mezcla formada en el tanque de aireación se le conoce como licor mezclado (LM), dicho LM es llevado al clarificador secundario (sedimentador), donde el sobrenadante clarificado es

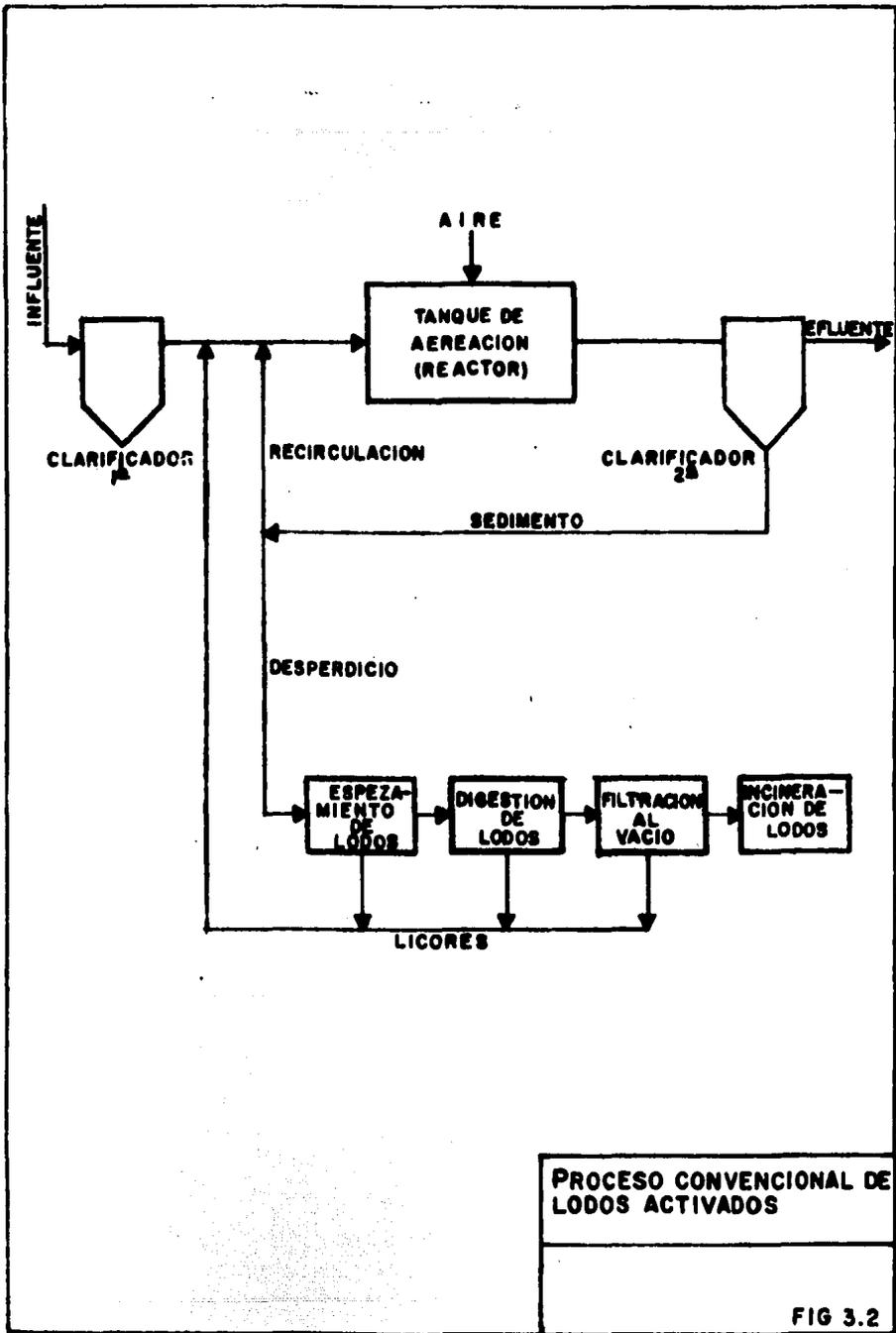


FIG 3.2

considerado como el efluente del sistema; la parte sedimentada (masa de microorganismos o bacterias floculadas) es dividida - en dos partes, una parte es recirculada y la otra es mandada a digestión, donde los lodos formados son incinerados y después- quizás, empleados como relleno de suelo.

El proceso de lodos activados ha sufrido variaciones a través del tiempo, sin embargo el proceso básico (proceso convencional) es el representado anteriormente. Algunas de las variantes del proceso básico y sus velocidades de carga (26) son mostrados en la siguiente tabla:

TABLA 3.8

VARIANTE	VELOCIDAD DE CARGA (lb DBO/1000 ft-día)
Aireación extendida	20
Proceso convencional	35
Aireación por etapas	50
Aireación activada	50
Estabilización por contacto	70
PROCESO Hatfield	70
Proceso Krauss	100
Aireación modificada	100
Floculación rápida	150
Supra-activación	400

De los procesos representados en la tabla anterior, las variantes más comúnmente conocidas son:

- Aireación extendida.

Es conocido también como proceso de oxidación total, su principal característica es minimizar la cantidad excesiva de lodo, aumentando el tiempo de residencia (lógicamente es mayor el volumen del reactor). La concentración de sólidos

lidos suspendidos volátiles en la aireación extendida es mayor que en la de los procesos convencionales (3500-5000 mg/lit); este proceso es aplicado en tratamiento de aguas-domésticas, de recreo y algunas industriales cuando las cantidades de éstas son pequeñas (menores de 2000 GPD).

- **Estabilización por contacto.**

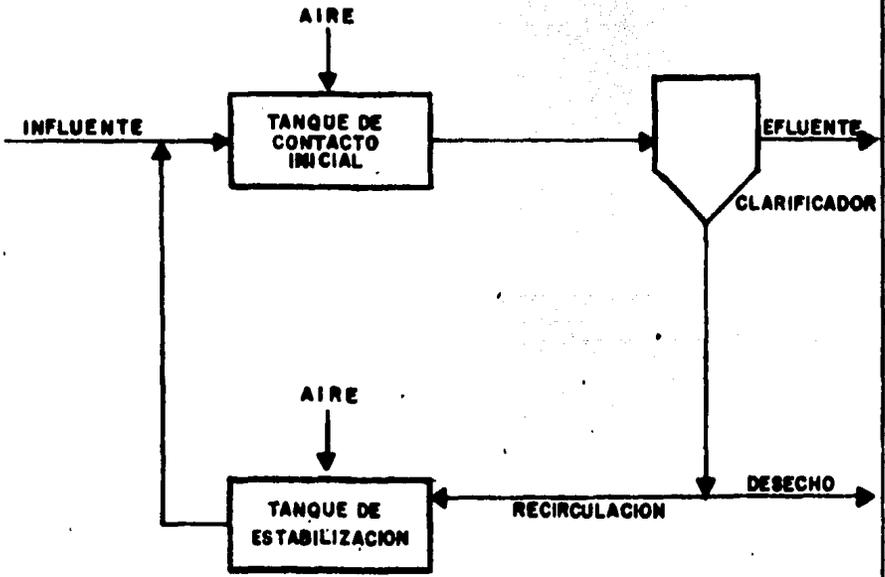
Esta variante del proceso de lodos activados, requiere de menos aire y espacio que el proceso de tratamiento original; aquí los lodos nuevos, se mezclan para su aireación con los lodos activados formados anteriormente en un tanque de oxidación o de digestión aeróbica durante un corto período de tiempo de 15 a 20 minutos. El porcentaje de eliminación de la DBO en este tipo de proceso es de alrededor del 92.5% para plantas piloto y del 93.4% para esca las naturales (13), aunque en realidad, esto es variable, pues depende de las condiciones existentes (medio ambiente, tiempo de retención, etc.).

La figura (3.3) de la siguiente hoja, representa el proceso de estabilización por contacto.

En este proceso, la mezcla de las aguas residuales y los lodos se clarifica por precipitación, en un período aproximado de 2hr., los lodos precipitados son oxidados por aireación en un período de 1 a 5hrs., volviendo al tanque de mezcla, formando nuevamente la mezcla aguas residuales y lodos activados. Resumiendo, se puede establecer que este proceso requiere de menos capacidad en los tanques de aireación que en los otros.

- **Proceso Krauss.**

Entre las desventajas que presente el proceso convencio -



**PROCESO DE ESTABILIZACION
POR CONTACTO**

FIG 3.3

nal de lodos activados, es la tendencia a que los lodos - floten; el proceso Krauss lo que pretende es evitar esto, controlando el índice volumétrico de los lodos, IVL (ver - más adelante). Esto se logra empleando en el proceso una sobreaireación separada para los lodos, aquí los sobrena - dantes del digestor y los lodos activados se airean juntos por lo menos 24 horas. En este proceso, se obtienen por - centajes de eliminación de la DBO hasta de un 90%.

- Aireación modificada.

En esta variante del proceso de lodos activados, lo que se pretende es suministrar la mayor cantidad de aire a los lo - dos, cuando están en óptimas condiciones para degradar la - materia orgánica absorbida.

Como se ha notado, en el proceso de lodos activados el mi - croorganismo es de gran importancia, estos microorganismos son bacterias que generalmente son Gram-negativos e incluyen miem - bros como (Pseudomonas, Zoogloas, Achromobacter, Flavo Bacte - rium, etc.), es característica importante de estas bacterias, que se agrupan en un flóculo para que puedan sedimentar facil - mente; sin embargo, en estos cultivos de microorganismos no en - contramos solamente bacterias (aunque son las que se encuen - - tran principalmente), sino que también encontramos protozoarios y rotíferos (la función de estos últimos es "pulir" el efluen - te, eliminando a las bacterias muertas) de esta forma, queda - especificada la función de la bacteria como el microorganismo degradante de la materia orgánica.

En resumidas cuentas, el proceso de lodos activados com - - prende "el contacto de aguas residuales contaminadas con un - cultivo mezclado de microorganismos bajo condiciones aeróbicas" donde la eficiencia del microorganismo para degradar las sus -

tancias contaminantes, depende de diferentes factores tales como:

- Su habilidad para absorber, adsorber y metabolizar contaminantes.
- Las condiciones ambientales (éstas pueden ser controladas regulando el pH, la temperatura, los nutrientes, la adición o extracción de oxígeno y un mezclado adecuado).
- La población dinámica del cultivo (crecimiento).
- El tiempo de contacto entre organismos y contaminantes.

Por otro lado, en los procesos de tratamiento con microorganismos en suspensión, la agitación permite un mayor contacto entre los microorganismos y los desechos, además de una mayor oxigenación del sistema. A medida que el tiempo de contacto aumenta, el tamaño del flóculo crece, aumentando por lo tanto la sedimentación; este tiempo de contacto, se le conoce como tiempo de residencia celular y en aguas residuales domésticas es de 3 a 4 días generalmente.

Además de los elementos anteriores, deberá considerarse la edad del lodo; los lodos viejos tienden a mineralizarse y a estar faltos de oxígeno (en realidad esto es lo que los hace viejos) formando consecuentemente lodos menos activos. El proceso de lodos activados requiere generalmente períodos relativamente largos de retención. Y de una demanda inicial alta de oxígeno en los líquidos mezclados; debe tenerse presente que existe una tendencia a producir lodos que floten, no se pueden producir una calidad intermedia de efluente, además de que se requieren proporciones altas de recirculación de lodos para altos valores de DBO y se requiere una gran cantidad de aire.

El diseño de un proceso de tratamiento de lodos activados, está basado principalmente en dos consideraciones, la cinética en el reactor y un balance de materia en el sistema.

Para el desarrollo del diseño, se identifican las corrientes y los parámetros que las definen, de acuerdo a la figura -- (3.4).

Los parámetros a considerar son:

Q = En MGPD (millones de galones por día)

DBO = En mg/lit (el propósito del tratamiento es reducir el valor de la DBO_1 a la DBO_4 con una eficiencia de remoción del 90 al 95%)

SSV = Sólidos suspendidos volátiles (mg/lit)

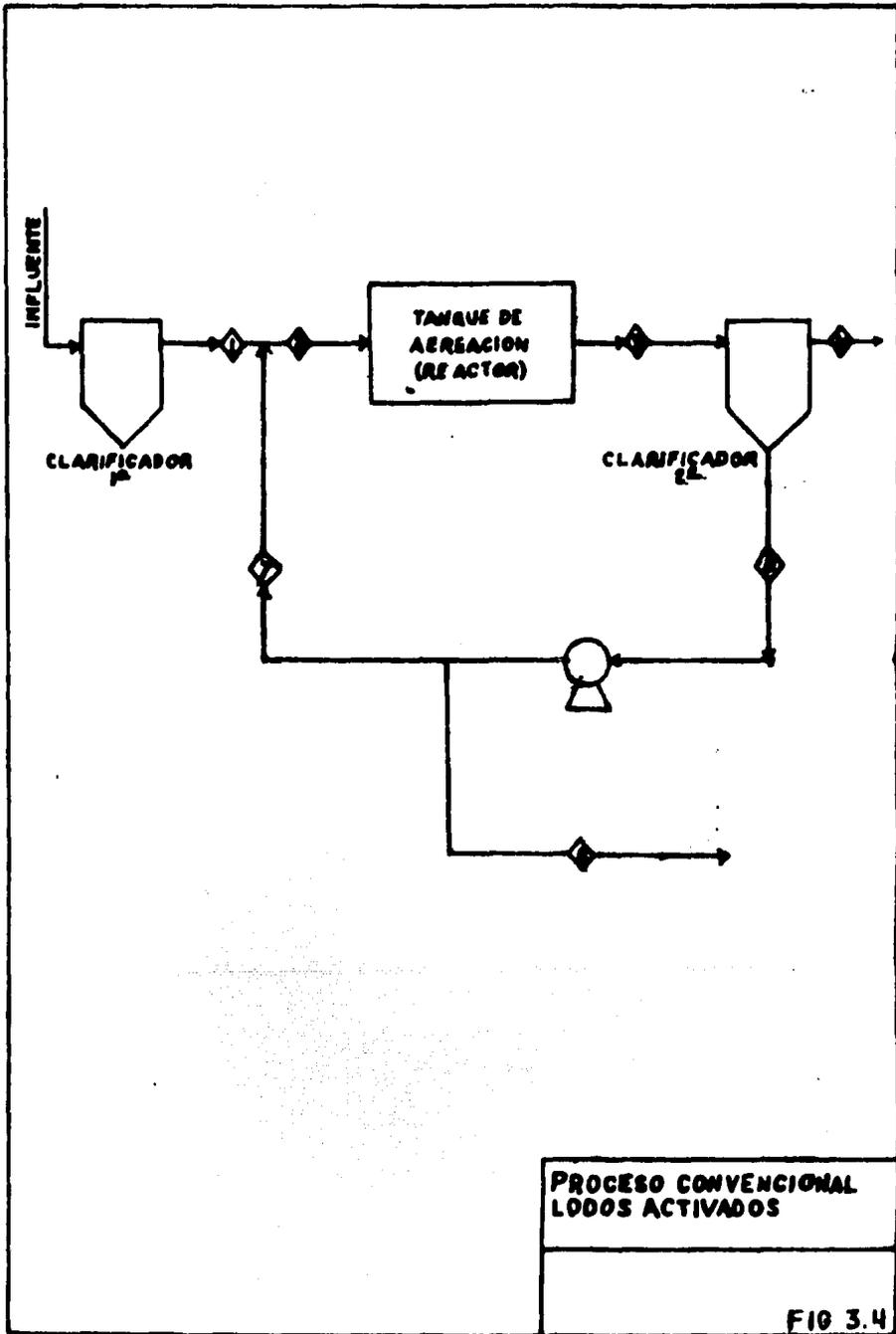
V = Volúmen del reactor.

1. La alimentación fresca y sus características, está considerada en la corriente 1 ; Q_1 , $(SSV)_1$ y $(DBO)_1$; en la alimentación, $(SSV)_1$, es frecuentemente despreciable ya que no hay gran aireación en esta etapa y por lo tanto no se ha podido generar sólidos biológicos volátiles (estos lodos están constituidos por una población heterogénea de microorganismos).

Por otro lado:

$$Q_1 = Q_4 + Q_6 \text{ --- (3.14)}$$

2. La corriente 2, representa la combinación de la corrien-

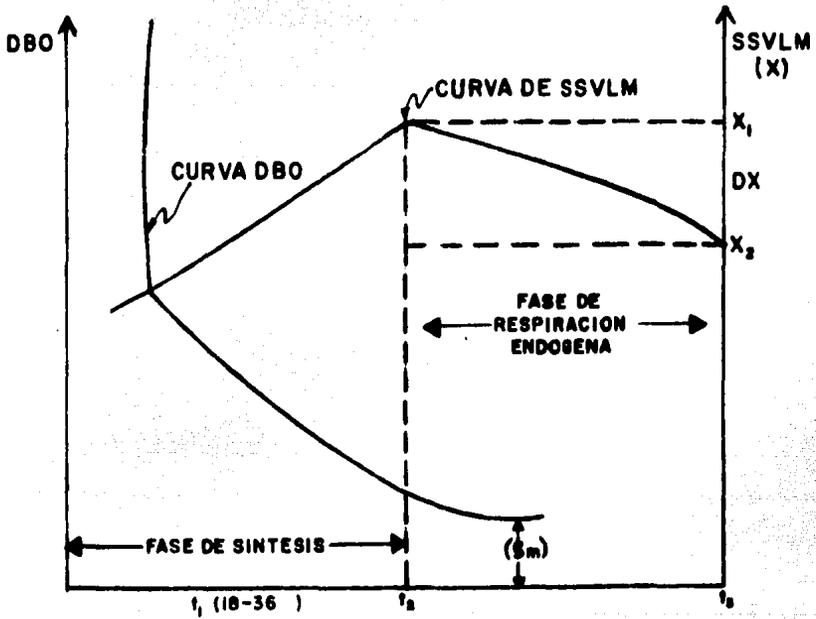


te 1 (alimentación) y la corriente 7 (recirculación). Los puntos $(SSV)_2$, $(SSNV)_2$ y $(DBO)_2$ pueden ser obtenidos de un balance de masa alrededor del punto de unión de las corrientes 1 y 7.

3. Se considera un reactor, RTAC (tanque agitado continuo). - En el reactor deben mantenerse los SSVLM (sólidos suspendidos volátiles de licor mezclado) constantes (de aquí que, parte de la corriente del sedimento del clarificador es recirculada, donde esta recirculación se calcula considerando que la concentración de SSVLM seleccionada para éste, - debe ser constante en todo el tiempo). Aquí, los SSNV (sólidos suspendidos no volátiles) son iguales a los $(SSNV)_2$, esto se debe a que se considera un mezclado total y los SSNV en el reactor no se reproducen.

Puesto que se da información de la velocidad de degradación del agua residual, a partir de ésta, se diseña el tamaño de los reactores biológicos aeróbicos, donde el compartimiento de la DBO y los SSV se representan diagramáticamente en la figura (3.5).

El agua residual conteniendo un inóculo de microorganismos, es introducida en el reactor (el inóculo es una masa de lodo biológico), y el aire comprimido, es soplado en el interior del sistema; al principio cuando hay gran concentración de sustrato, los SSV aumentan, puesto que el sustrato provee el alimento suficiente para producir el crecimiento sustancial de los microorganismos (fase de síntesis), después, la curva de SSV decrece cuando la velocidad de destrucción de los microorganismos excede a su velocidad de síntesis (fase de respiración endógena). (S_m) representa la DBO no removible debido a la presencia de material no biodegradable. El comportamiento de la con



CORRELACION TIPICA DE LA DBO Y LOS SSV CONTRA EL TIEMPO

FIG 3.5

centración SSVLM y de la DBO para un reactor continuo y uno por lotes se define en la siguiente tabla:

TABLA 3.6

REACTOR	CONCENTRACION DBO	CONCENTRACION SSVLM
CONTINUO	<ul style="list-style-type: none"> - Permanece constante a un valor $DBO_3 = DBO_4$ - Corresponde a una baja concentración de sustrato - DBO es menor de 500 mg/lit 	<ul style="list-style-type: none"> - Permanece constante a un valor (SSV_3) seleccionado; esto se obtiene por efecto de la recirculación del lodo
BATCH	<ul style="list-style-type: none"> - La DBO no es constante - Corresponde a una alta concentración del sustrato 	<ul style="list-style-type: none"> - SSV no permanece constante

Para la formulación de un RTAC, se sigue una cinética de primer orden:

$$\frac{d(DBO)}{dt} = -K_0(DBO) = \text{velocidad de remoción del sustrato.}$$

$$\frac{1}{(SSV)_3} \frac{d(DBO)}{dt} = -K(DBO) \text{ --- (3.16)}$$

Donde:

$$K_0 = K (SSV)_3$$

Puesto que a condiciones estables no hay cambio en el sustrato del reactor, entonces:

material orgánico que entra = material orgánico que sale +
material orgánico que reacciona.

$$Q_2(DBO)_2 = Q_2(DBO)_3 + K(SSV)_3 (DBO)_3 V \quad (3.17)$$

$K(DBO)_3$ representa la velocidad de remoción del sustrato por unidad de concentración de SSVLM.

$$K(DBO)_3 = \frac{Q_2 [(DBO)_2 - (DBO)_3]}{V (SSV)_3} \quad (3.18)$$

Pero:

$$Q/V = t^{-1} \quad (\text{tiempo de residencia})$$

Por lo tanto:

$$K(DBO)_3 = \frac{(DBO)_2 - (DBO)_3}{t(SSV)_3} = \frac{\text{Mg de DBO removida}}{(\text{Mg de SSVLM})(\text{día})} \quad (3.19)$$

Es necesario considerar que en el mecanismo de la degradación biológica aeróbica, el sustrato removido durante el proceso se lleva a cabo en dos formas:

1. Oxidación del sustrato.

Que representa la producción de energía (junto con los productos comunes de oxidación tales como CO_2 y H_2O); la fracción del sustrato removida en esta forma será X_1 y el balance de la DBO, representará las libras de DBO removidas usadas para la producción de energía sobre la libra de DBO removida, (esta energía es utilizada por las células para el mantenimiento de sus funciones naturales).

2. Fase síntesis.

Donde parte del sustrato después de ser consumido, es utilizado para producir nuevos microorganismos; la fracción del sustrato removido que es usado para síntesis será X_2 y en el balance de la DBO representará las libras de DBO removidas utilizadas para síntesis sobre libra de DBO removida, (nótese que $X_1 + X_2 = 1$). Además de la DBO, es necesario considerar a los SSVLM en la fase de síntesis, para esto emplearemos el parámetro X_2' que representará las libras de SSVLM producidos sobre la libra total de sustrato removido (la relación entre X_2 y X_2' estará definida por el cociente del peso molecular del producto y el peso del reactivo de la reacción química correspondiente).

Observando la figura (3.5), puede notarse que después de un tiempo determinado se pasa a la fase de respiración en dógena, donde una fracción X_3 de SSVLM son oxidados por unidad de tiempo, las libras de oxígeno por día requeridas para esto, estarán definidas por X_3' donde:

$$X_3' = \text{libra } \text{O}_2 / (\text{día-libra SSVLM que entra al reactor})$$

Entonces la cantidad total de oxígeno requerido para la especificación del equipo de aireación estará dado por la suma del oxígeno requerido para la producción de energía-

(fracción X_1) y el oxígeno requerido para la respiración-endógena.

$$\frac{\text{lb O}_2 \text{ totales}}{\text{día}} = X_1 \left[(\text{DBO})_2 - (\text{DBO})_3 \right] Q_2 + X_3' (\text{SSV})_3 V \quad (3.20)$$

4. La corriente 3, representa las condiciones en el efluente del reactor, debe considerarse que $(\text{SSNV})_3 = (\text{SSNV})_2$, es decir, en el reactor los SSNV permanecen invariables. Además cabe aclarar que la densidad de todas las corrientes de licor, se consideran iguales a las del agua a temperatura ambiente (62.43 lb/ft^3), puesto que se consideran soluciones acuosas diluidas.
5. El clarificador se dimensiona para producir la concentración de $(\text{SSV})_5$, seleccionada normalmente entre 10 y 15 gr/lit. En el diseño de un sistema de lodos activados, deben considerarse las relaciones para las condiciones óptimas de sedimentación del lodo. Cuando el lodo es ligero y blando, su sedimentación se hace difícil, ocasionando una salida de éste por el efluente aumentando consecuentemente la DBO. La evaluación de las características del lodo, se rige por los siguientes parámetros:
 - a) Velocidad a la cual el lodo sedimenta (velocidad de sedimentación sonal; VSZ).
 - b) Índice volumétrico del lodo (IVL); que representa el volumen específico (en cm^3/gr) de sólidos secos de lodo, después de haberse sedimentado por un periodo de 30 minutos.

- c) Fracción de alimentos para los microorganismos; - conocido como parámetro (F/M) donde:

$$F/M = \frac{\text{libras de sustrato en el influente}}{(\text{día}) (\text{lb de SSVLM en el reactor})}$$

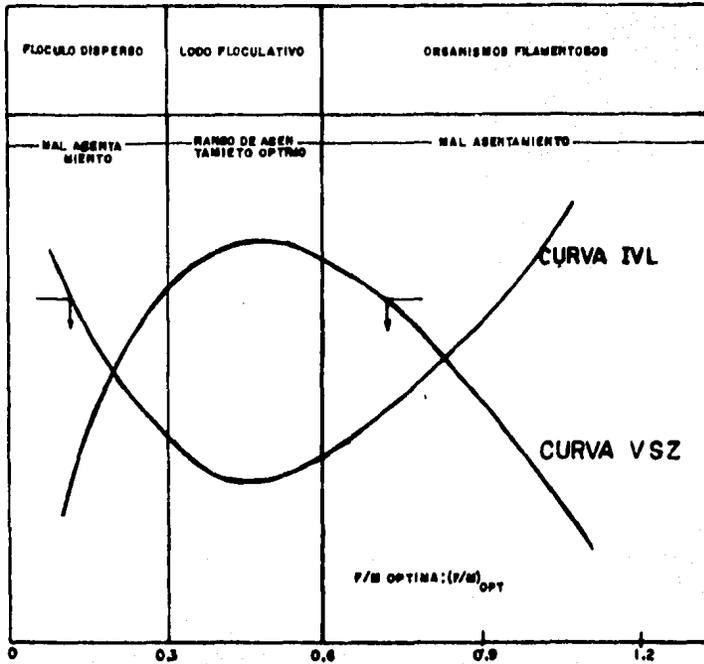
$$(F/M) = \frac{(Q_2) (DBO)_2}{(SSV)_3 (V)} = (\text{días}^{-1}) \text{ - - - - - (3.21)}$$

La relación de los tres parámetros se muestra en la figura (3.6).

En esta figura, se puede observar lo siguiente; un IVL pequeño, indica lodo de fácil sedimentación. El valor adecuado para F/M debe estar entre 0.3 y 0.6 para una sedimentación óptima (si F/M < 0.3 indica que el sustrato es insuficiente. Si F/M > 0.6 predomina un microorganismo de naturaleza filamentososa que puede permanecer en suspensión de manera indefinida). El tiempo de residencia requerido para producir una floculación adecuada está definido por:

$$t = \frac{(DBO)_2}{(SSV)_3 (F/M)_{opt}} \text{ - - - - - (3.22)}$$

6. La corriente 4 representa el efluente del sistema una vez que éste ya ha sido separado del lodo en el clarificador secundario; en esta corriente se puede suponer como buena aproximación que $(SSV)_4 \approx 0$, mientras de la $(DBO)_4$ estará por el orden del 5 al 10% de la $(DBO)_1$ considerando el porcentaje de remoción ya establecido anteriormente.
7. La corriente 5 representa el sedimento del clarifica-



**CORRELACION TIPICA DE IVL
Y VSZ CON LA RELACION:
F/M**

FIG. 3.6

dor secundario, debe considerarse que las concentraciones respectivas de SSV, SSNV y DBO son las mismas para el sedimento del clarificador, la corriente de desecho 6 y la corriente de recirculación 7 .

8. La línea 6, representa la corriente de desecho, en realidad ésta no es continua sino intermitente (suponerla continua nos ayuda en el balance de masa sin introducir grandes errores), el desecho de esta corriente en comparación con la de recirculación es pequeño, en esta corriente una producción neta de SSVLM es desechada como lodo, la determinación de la producción neta de lodo de SSV se define como la diferencia entre el lodo producido y el lodo destruido de acuerdo a la siguiente ecuación:

Producción neta de lodo (lb SSVLM/día) = DSSV

$$DSSV = X_2' \left[(DBO)_2 - (DBO)_3 \right] Q_2 - X_3 (SSV)_3 V \quad (3.23)$$

Debe considerarse que el desecho también debe tener SSNV que tienen que considerarse en el desecho de los lodos:

$$DSSNV = Q_1 \left[(SSNV)_1 - (SSNV)_2 \right] + Q_6 (SSNV)_4 \quad (3.24)$$

Por lo tanto:

Producción total de lodo:

$$= X_2' \left[(DBO)_2 - (DBO)_3 \right] Q_2 - X_3 (SSV)_3 V + Q_1 \left[(SSNV)_1 - (SSNV)_2 \right] + Q_6 (SSNV)_4 + Q_1 (SSV)_1 \quad (3.25)$$

9. La línea 7, representa la corriente de recirculación. Aquí; $Q_7 = RQ_1$, donde R representa la relación de recirculación conforme a la corriente de alimentación.

$$Q_2 = Q_1 + Q_7 = Q_1 (1+R) \quad (3.26)$$

Para obtener la relación de recirculación se establece un balance para los SSV de tal forma que:

$$Q_2(SSV)_2 = Q_1(1+R)(SSV)_2 = DSSV + Q_1(SSV)_1 + RQ_1(SSV)_5$$

Despejando para R tenemos:

$$R = \frac{Q_1 (SSV)_2 - DSSV - Q_1 (SSV)_1}{Q_1 [(SSV)_5 - (SSV)_2]} \quad (3.27)$$

Puesto que $V = Q_2 t$, entonces:

$$V = Q_1 (1+R) t \quad (3.28)$$

Ahora sustituyendo la ecuación (3.23) en (3.27) y sustituyendo Q_2 por su equivalente de la ecuación (3.26) tenemos:

$$R = \frac{(SSV)_3 - X_2' [(DBO)_2 - (DBO)_3] (1+R) + X_3(SVV)_3(1+R)t - (SSV)_1}{(SSV)_5 - (SSV)_3} \quad (3.29)$$

"t" representa el tiempo de residencia en el reactor y se evalúa en base a dos criterios:

a) Calidad de efluente; donde

$$t = \frac{(DBO)_2 - (DBO)_3}{K (SSV)_3 \left[(DBO)_3 - (DBD)_n \right]} \quad \text{--- (3.30)}$$

Donde $(DBO)_n$ representa la DBO por concepto de material no biodegradable.

- b) Criterio F/M; evaluación del tiempo para la floculación y sedimentación, ecuación (3.21).

$$t = \frac{(DBO)_2}{(SSV)_3 (F/M)}$$

El tiempo que se debe tomar, lógicamente debe ser el mayor (criterio controlante).

El procedimiento de diseño más comúnmente usado es el que aparece en la bibliografía (22) (proceso Eckenfelder) con excepción de la especificación del equipo de aireación que se obtuvo de la bibliografía (12); así que los pasos son:

- Seleccionar los valores de:
 - a) $(SSVLM)_3$; similar al valor dentro del reactor, está generalmente en el rango de 2000 a 4000 mg/l.
 - b) $(SSVLM)_5$; considerar este valor de 10000 a 15000 mg/l.
 - c) F/M; seleccionarlo de 0.3 a 0.6.
- Puesto que no se conoce aún que tiempo controla, es necesario calcular la relación de recirculación de los SSVLM bajo las dos consideraciones:

$$R_1 = \frac{(SSV)_3 - X_2' [(DBO)_1 - (DBO)_3] + X_3 \frac{(DBO)_1 - (DBO)_3}{K [(DBO)_3 - (DBO)_n]} - (SSV)_1}{(SSV)_5 - (SSV)_3}$$

(si la calidad controla).

$$R_2 = \frac{(SSV)_3 - X_2' [(DBO)_1 - (DBO)_3] (F/M) + X_3 (DBO)_1 - (SSV)_1 (F/M)}{[(SSV)_5 - (SSV)_3] (F/M) - X_3 (DBO)_1}$$

(si la floculación y sedimentación controlan).

- Cálculo de la $(DBO)_2$ para la carga orgánica

$$(DBO)_2 = \frac{(DBO)_1 + R_1 (DBO)_5}{1 + R_1}$$

(la calidad controla)

$$(DBO)_2 = \frac{(DBO)_1 + R_2 (DBO)_5}{1 + R_2}$$

(la floculación y sedimentación controlan)

- Se calcula el tiempo de residencia (t) para ambas consideraciones, se selecciona el (t) mayor y de aquí consecuentemente se sabe que "R" seleccionar y que $(DBO)_2$ considerar.

$$t_1 = \frac{(DBO)_2 - (DBO)_3}{K (SSV)_3 [(DBO)_3 - (DBO)_n]}$$

$$t_2 = \frac{(DBO)_2}{(SSV)_3 (F/M)}$$

- Se calcula el volumen del reactor:

$$V = Q_1 (1+R) t$$

- Se calcula la producción neta de SSVLM con la ecuación (3.23)

- Se calcula el caudal del efluente (Q_4) y el desecho (Q_6):

$$Q_6 = \left[(DSSV + (SSV)_1 Q_1) \right] / (SSV)_5$$

$$Q_4 = Q_1 - Q_6$$

- Los DSSNV y la producción total de lodos se obtendrá de:

$$DSSNV = Q_1 \left[(SSNV)_1 - (SSNV)_2 \right] + Q_6 (SSNV)_4$$

y la producción total de lodos de la ecuación (3.25)

- Los requerimientos de oxígeno estarán dados como ya se definió anteriormente:

$$(\text{masa de } O_2/\text{día}) = X_1 \left[(DBO)_1 - (DBO)_3 \right] Q_1 + X_3' (SSV)_3 V$$

(nótese que la ecuación (3.20) nos da el mismo resultado).

- Especificación de los requerimientos de nutrientes

$$\text{MASA N/día} = 0.12 \text{ DSS } V + Q_1 * (\text{factor de ajuste de unidad})$$

$$\text{MASA P/día} = 0.02 \text{ DSS } V + 0.5 Q_1 * (\text{factor de ajuste de unidad}).$$

- Revisión de los requerimientos de neutralización. Para aguas alcalinas, la regla a considerar establece que 0.5 lb de alcalinidad como (CaCO_3) es removida por 1 lb de DBO, lo que es frecuentemente utilizado.

- Especificación del equipo de aireación. Para la difusión del aire existen diferentes métodos usuales, dependiendo de la cantidad de oxígeno requerido, entre los métodos más comunes están (12):

- Aireación por difusión:
Cuando el oxígeno requerido es $< 40\text{mg}/(\text{lt-hr})$
- Turbina sumergida:
Cuando el oxígeno requerido es $> 80\text{mg}/(\text{lt-hr})$
- Aereadores superficiales de baja y alta velocidad:
(aceptables para $< 80\text{mg}/(\text{lt-hr})$ de O_2 requerido).

De estos, los dos primeros son los más empleados:

1. Aireación por difusión.

Este tipo de sistemas son afectados por el espaciamiento entre difusores, ancho y profundidad del tanque; la potencia teórica de los difusores S_T , puede calcularse por:

$$S_T = 0.00436 Q_1 P_1 \left[\frac{K}{K-1} \right] \left[\left(P_2/P_1 \right)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right]$$

Donde:

$$K = C_p/C_v \approx 1.395$$

P_1 = presión absoluta de entrada PSIA

P_2 = presión absoluta de salida PSIA

Q = gasto de entrada de aire ft^3/min .

La potencia al freno del compresor se obtiene de:

$$BHP = S_T / e$$

Donde:

$e = 0.65-0.80$ (dependiendo del compresor, si es centrífugo o recíprocante).

En el mercado hay difusores de burbuja fina (tiene mayor transferencia de O_2 pero mayor mantenimiento y consumo de energía), y difusores de burbuja gruesa.

2. Aireación por turbina:

Estos son empleados cuando hay fluctuaciones en la

utilización de O_2 ; consiste en la combinación de un agitador mecánico y un difusor de burbuja gruesa; considerar que la transferencia de O_2 para un solo impulsor es del orden de (1.5-2) lb de O_2 /HP-hora.

El diámetro de la turbina con respecto al tanque generalmente varía de 0.1 a 0.2.

Por otro lado, debe considerarse que el aire contiene aproximadamente el 21% de oxígeno y que generalmente es absorbido tan solo del 6 al 10%.

Los costos de este proceso de tratamiento (sin incluir terreno, varían dependiendo de la capacidad)

Hacia 1983, los costos (12) eran los siguientes:

1 MGD		10 MGD		50 MGD	
C.C	C.O.M	C.C	C.O.M	C.C	C.O.M
2535568	169654	10080171	834263	36001877	3231020

C.C. = costos de construcción US\$

C.O.M.= costos de operación y mantenimiento US\$

Hacia 1983 existían en México 48 (19) instalaciones de proceso de tratamiento de lodos activados, 18 de los cuales son referidas a plantas municipales y 21 a plantas industriales; este proceso de tratamiento representa el 16.8% del total de las aguas residuales tratadas en el país. El área requerida por este tratamiento, depende de la capacidad, así por ejemplo:

$$Q = 43.82 \text{ l/seg} ; A = 2.3 \text{ Ha}$$

$$Q = 438.2 \text{ l/seg} ; A = 8.8 \text{ Ha}$$

En México, lo mismo que para otros procesos de tratamiento, la mayoría de estas instalaciones se operan ineficientemente (19) o están abandonadas; el proceso es útil para industrias que manejan descargas orgánicas y es de los más empleados de entre los procesos de tratamiento de aguas residuales.

3.3 PROCESO DE FILTROS ROCIADORES.

Este proceso de tratamiento se inició en Inglaterra a fines del siglo pasado y se emplea para tratar residuos líquidos, ya sean domésticos o industriales. En el proceso se degrada el material orgánico (adsorbiéndolo primero y oxidándolo después) percolando el líquido sobre bacterias existentes en un medio formado por roca (basalto, granito, CaCO_3 , etc.) o plástico.

Un sistema de filtros rociadores, está compuesto principalmente por las boquillas de distribución, las superficies de contacto y las unidades de drenaje.

La forma de los filtros rociadores, depende de las características de las boquillas de distribución; así, si las boquillas son fijas los filtros rociadores deberán ser rectangulares, mientras que si son rotativas, los filtros tienen una forma circular (el sistema rotativo gira a 380 RPM).

El proceso de un filtro rociador con recirculación está esquematizado en la siguiente figura:



Figura 3.7

En la figura anterior, debe considerarse que si la DBO excede el valor de 500mg/lit, el sistema deberá diseñarse con recirculación (12), y si la DBO es < 500 mg/lit no será necesario (valores menores a 500 mg/lit aseguran condiciones aerobias).

El proceso aerobio requiere de oxígeno mediante el cual se lleva a cabo la conversión de carbono y del nitrógeno, este último se caracteriza porque en los primeros pies de profundidad del filtro se efectúa una liberación de NH_3 , seguida respectivamente por la formación de NO_2 y NO_3 de acuerdo a la siguiente forma:

Adsorción y liberación de:

NH_3	↑	1.829 m
NO_2	↓	1.829 m
NO_3	↓	1.829 m

Los datos anteriores representan los cambios característicos del nitrógeno en función a la profundidad del filtro.

La selección de la profundidad del filtro dependerá de la carga orgánica y la eficiencia deseada en el filtro; para medios filtrantes constituidos por rocas se emplean profundidades de 1 a 3 metros y diámetros de 5 a 10 cm., mientras que si el medio es de plástico se emplean profundidades hasta de 12 metros; además debe considerarse que cuanto más pequeños sean los trozos de rocas, mayor será la purificación puesto que se aumentará el medio de contacto por unidad de masa de rocas, sin embargo los medios pequeños pueden obturar el filtro y limitar por tanto la circulación del aire (el cual es insuflado en la parte inferior de cada sección), en cambio un medio grande reduce el área de contacto del líquido con la roca y baja la eficiencia, "debe resumirse que estos filtros actúan como oxidantes y como filtros" (4). Así cuando se emplee un medio filtrante con "superficie específica alta" debe minimizarse la carga hidráulica para evitar una acumulación excesiva de materia orgánica.

En este proceso de tratamiento, el tiempo de contacto es relativamente corto comparándolo con un proceso de lodos activados.

Debe considerarse, que entre más profundos son los filtros existe un creciente grado para la eliminación de la DBO; sin embargo, los filtros poco profundos (así como las piedras grandes) ayudan a reducir tanto los costos iniciales como los costos de operación; entre las desventajas que se han encontrado en este proceso están el espacio que ocupan, el rendimiento variable (según la época del año), problemas de encharcamientos y obstrucciones, limitaciones en la carga orgánica e hidráulica. Las aplicaciones de los filtros rociadores es común a las industrias que manejen desechos orgánicos tales como la industria textil, las cortidurías, enlatados (caracterizados por tener una carga orgánica alta), lácteos, cervecera, etc.

En el procedimiento de diseño, lo que se pretende calcular es el volumen requerido del filtro, como una función de la DBO, el flujo del líquido y la eficiencia deseada. Para obtener este volumen se emplea la siguiente ecuación (basada en el método del Consejo Nacional de Investigación) (13):

$$1/V = \frac{43560 F}{W} \left[\frac{11764.7}{E} - 117.65 \right]^2 \quad \text{--- (3.31)}$$

Donde:

- E = % o eficiencia de remoción de la DBO
- W = peso de la DBO aplicada por día, (lb/día)
- V = volumen del filtro (ft³)
- F = número de pasadas efectivas por el filtro (referido a la circulación hidráulica).

$$F = \frac{1 + R}{(1 + 0.1R)^2} \quad \text{--- (3.32)}$$

Donde:

R = relación de reciclo

La cinética en un filtro rociador, opera de forma similar a un proceso intermitente de lodos activados (reacción de primer orden).

El tiempo medio de retención T_m , será:

$$T_m = \frac{CD^m}{Q^n}$$

Donde:

Q = carga hidráulica (GPM/ft²)

D = profundidad del filtro (ft)

C, M, N = constantes

Si consideramos a "S" como la sustancia orgánica remanente y considerando reacción de primer orden:

$$r_s = - \frac{ds}{dt} = K'S$$

$$\text{Se} \int \frac{ds}{s} = \int_{t=0}^{T_m} K' dt$$

e, i; efluente e influente

Integrando y aplicando la ecuación (3.33)

$$\ln \frac{S_e}{S_i} = \frac{K' \cdot C \cdot D^m}{Q^n}$$

$$\frac{S_e}{S_i} = \exp \frac{K D^m}{Q^n} \quad \text{--- (3.34)}$$

Donde los valores de las constantes, se obtienen experimentalmente a partir de diferentes corridas en laboratorio, obteniéndose diferentes porcentajes de DBO remanente para diferentes profundidades y diferentes cargas hidráulicas.

Como ya se mencionó anteriormente, para mejorar la eficiencia a veces es necesario recircular el líquido en el filtro, entonces la ecuación (3.34) quedaría:

$$\frac{S_e}{S_a} = \exp (-X) \quad \text{--- (3.35)}$$

Donde:

S_a = contenido orgánico por dilución

$$X = - \frac{K D^m}{Q^n}$$

Entonces:

$$S_a = \frac{S_i + R S_e}{1 + R} \quad \text{--- (3.36)}$$

Finalmente:

$$\frac{Se}{Si} = \frac{e^{-x}}{1 + R - Re^{-x}} \quad \text{---(3.37)}$$

Los costos unitarios de proceso sin incluir construcción están dados por la ecuación (12)

$$C = 3.66 * 10^5 Q^{0.46} \quad (\text{filter tricicling})$$

Donde:

Q = caudal en MGD

C = costo de operación y mantenimiento US\$

Que es lo suficientemente aproximada para estudios comparativos.

Actualmente (19) existen construídos en México, 7 sistemas cuyo proceso de tratamiento de aguas residuales y desechos industriales, está basado en los filtros rociadores o percoladores, lo cual representa un 2.5% del total de las aguas tratadas en el país.

3.4 SISTEMA BIODISCO.

El proceso biodisco surgió en Alemania a principios de este siglo, y está caracterizado, por una serie de discos paralelos que giran parcialmente (con una área sumergida aproximadamente en un 40%) en el desecho acuoso, este proceso de tratamiento se ha desarrollado principalmente en Europa Occidental, donde hacia 1984 había localizadas aproximadamente 1000 instalaciones, variando su tamaño de 24000 a 55000 "equivalentes de población" para tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales (un equivalente de población, equipara la contaminación industrial con el de cierto número de personas, en base a que "una persona equivalente" contribuye con 0.2 libras de sólidos suspendidos 0.167 libras de DBO).

Este proceso de tratamiento, recibe también el nombre de contactor biológico rotatorio y es usado principalmente para remover la DBO soluble y el nitrógeno amoniacal; el equipo está constituido principalmente de una flecha con una serie de discos de plástico de 3 a 4 mt. de diámetro, colocados en un tanque de concreto en cuyo interior se encuentra el agua residual donde se sumerge parte del disco, la superficie del disco se cubre con una película biológica de 2 a 4mm de espesor, donde adsorbe y absorbe la materia orgánica coloidal y presente disuelta en las aguas residuales. La rotación del disco lleva una película de agua residual al aire donde absorbe el oxígeno necesario para que los microorganismos degraden la película -- aeróbicamente; el exceso de lodo formado se desprende gradualmente del disco y se separa posteriormente por precipitación.

La película formada en el disco, está caracterizada por presentar 3 etapas denominadas:

- a) Fase de inducción: representa la adhesión de las bacterias sobre la superficie.
- b) Fase acumulación: representa el crecimiento de la población de bacterias.
- c) Fase "plateau": representa el equilibrio entre la película biológica producida y la desprendida.

Los parámetros que afectan el proceso, practicamente son - los mismos que en los otros procesos de tratamiento (excepción hecha por la rotación de los discos, que por afectar el proceso de tratamiento, constituyen una variable más a considerar); así por ejemplo, el mejor valor de pH con respecto a la eficiencia- está entre 6.5 y 8.5 (igual que en los otros proceso de trata- miento); las temperaturas entre 13 y 32°C no tienen efecto en - el desarrollo del sistema (sin embargo, a temperaturas mayores- puede esperarse un cambio en la diversidad del cultivo de micro organismos y a temperaturas menores, una disminución en la efi- ciencia del sistema).

En lo que respecta a la rotación de los discos y a la velo- cidad del giro de éstos, debe considerarse que:

- a) Establecen un fuerte contacto entre la película y el desecho (debe también considerarse que el disco rotativo proporciona un soporte mecánico para la - población microbiana).
- b) Proporciona un mecanismo de aireación cuya capaci- dad se puede ajustar cambiando la velocidad de ro- tación.

- a) Fase de inducción: representa la adhesión de las bacterias sobre la superficie.
- b) Fase acumulación: representa el crecimiento de la población de bacterias.
- c) Fase "plateau": representa el equilibrio entre la película biológica producida y la desprendida.

Los parámetros que afectan el proceso, practicamente son - los mismos que en los otros procesos de tratamiento (excepción hecha por la rotación de los discos, que por afectar el proceso de tratamiento, constituyen una variable más a considerar); así por ejemplo, el mejor valor de pH con respecto a la eficiencia está entre 6.5 y 8.5 (igual que en los otros proceso de tratamiento); las temperaturas entre 13 y 32°C no tienen efecto en - el desarrollo del sistema (sin embargo, a temperaturas mayores - puede esperarse un cambio en la diversidad del cultivo de microorganismos y a temperaturas menores, una disminución en la eficiencia del sistema).

En lo que respecta a la rotación de los discos y a la velocidad del giro de éstos, debe considerarse que:

- a) Establecen un fuerte contacto entre la película y el desecho (debe también considerarse que el disco rotativo proporciona un soporte mecánico para la - población microbiana).
- b) Proporciona un mecanismo de aireación cuya capacidad se puede ajustar cambiando la velocidad de rotación.

- c) Distribuye uniformemente el O_2 y el sustrato de la biomasa.
- d) Ocasiona un espesor de película constante.
- e) Proporciona un mezclado en el contenido del tanque (cuando aumenta la velocidad de giro, mejora la condición de mezclado en el sistema).
- f) Establece un contacto entre los lodos biológicos y las aguas residuales, cuya intensidad se puede variar cambiando la velocidad de rotación.
- g) Se obtienen mejores eficiencias a velocidades de giro de 2 RPM.
- h) La velocidad de renovación de la película biológica, aumenta con la velocidad de giro, sin embargo, esto ocasiona un incremento en el desprendimiento de la biomasa, un mayor mantenimiento y un aumento en el consumo de energía.

La eficiencia del tratamiento se incrementa, disponiendo el sistema en una serie de cuando menos tres etapas.

Para el diseño de este proceso de tratamiento, es necesario considerar el modelo cinético (16) cuyo fundamento es similar a los otros procesos; de esta forma, el sustrato removido por la acción microbiana, equivaldrá a la diferencia de la masa del sustrato entrante y saliente.

Cuya representación matemática está dada por:

$$\frac{ds}{dt} = Q (s_i - s_e) \quad (3.38)$$

Donde:

S = representa la concentración del sustrato (M/L^3), lo que puede manejarse, como DBO que deberá removerse, como se hizo en el proceso de lodos activados.

La remoción del sustrato o de la DBO puede representarse como (16):

$$\frac{ds}{dt} = \frac{V_{max} \frac{Q S_i}{A}}{K_B + \frac{Q S_i}{A}} \quad (3.39)$$

Donde:

V_{max} = tasa máxima específica de remoción del sustrato (M/L^2t)

K = constante de proporcionalidad

De las dos ecuaciones anteriores se tiene:

$$\frac{V_{max} \frac{Q S_i}{A}}{K_B + \frac{Q S_i}{A}} = \frac{Q (S_e - S_i)}{A}$$

luego, sacando inversa y desarrollando:

$$\frac{K_B}{V_{max}} \frac{A}{Q S_i} + \frac{1}{V_{max}} = \frac{A}{Q (S_e - S_i)} \quad (3.40)$$

Algunos de los criterios de diseño recomendados para este proceso (17) son:

- a) 40% de área sumergida
- b) 2.1m de profundidad
- c) Serie mínima de 4 etapas
- d) Para influentes con una DBO mayor a 300 mg/l considerar una relación volumen-superficie de 0.49 - $1t/m^2$
- e) Para obtener una DBO del efluente de 15 a 30PPM - considerar una carga hidráulica de 81.5 lt/m^2 a - 163 lt/m^2 .

Además en el diseño debe considerarse la interrelación existente entre la DBO removida y la velocidad de giro (deberá disminuir a medida que aumente el diámetro del disco).

En algunas industrias (lecheras principalmente) se ha encontrado que para cargas de 53.5 kg de DBO por día, se han obtenido rendimientos del 90 al 100% de DBO removida.

Algunas características (ventajas) que deberán considerarse para este proceso son las siguientes (29):

- Las necesidades de energía para los sistemas bio-disco son pequeños (menor aproximadamente en un 28% a los sistemas de lodos activados (30)).
- En estos sistemas no existen problemas de ruido (al contrario de lodos activados).
- Facilidad en el muestreo, puesto que puede hacerse en puntos intermedios, además si se requieren

productos químicos, podrán agregarse en el punto deseado.

- Se eliminan molestias como moscas y malos olores,
- Facilidad en su construcción y funcionamiento.
- Para su mantenimiento se requiere un mínimo de personal especializado (debido a su facilidad de operación y mantenimiento); además su supervisión es mínima.

Sin embargo este proceso de tratamiento no solo tiene estas características, hay que tener en cuenta que por ser un proceso nuevo no existen criterios en su diseño a seguir (no hay información suficiente), por sus características es un sistema bastante voluminoso y pesado por lo que su transporte e instalación requiere de muchas precauciones.

En México existe una inexperiencia total sobre este proceso de tratamiento, por otro lado puede considerarse que los costos efectivos y competitivos de este proceso, son similares a los del proceso de lodos activados (31) (aunque se sabe que los costos de inversión inicial son mayores).

4. ANALISIS GRAFICO.

Una vez desarrollados los procesos de tratamiento fundamentales para el material orgánico, resulta necesaria la comparación entre estos, para considerar el mas adecuado a nuestros recursos y necesidades.

Nuestro objetivo esencial, no constituye precisamente el desarrollar una técnica de toma de decisiones, sino mas bien, establecer los elementos necesarios para poder calificar un determinado criterio adecuadamente, esto es, se pretende definir en primer instancia una relación entre dos características y después (de ser posible) detallar esta relación. Para lo anterior, resulta indispensable comprender de la mejor manera posible, los procesos de tratamiento a comparar. Para esto, emplearemos una herramienta muy eficaz, la gráfica, la cual nos permitirá establecer diagramáticamente la posición y relación de las características de los procesos de tratamiento, para que finalmente se puedan evaluar conceptualmente (esto es, se somete a análisis la etapa anterior al desarrollo de una técnica de toma de decisiones; la comparación).

4.1 INTRODUCCION A LA TEORIA DE GRAFICAS.

Una gráfica es un elemento de expresión abstracta que describe por medio de un dibujo el comportamiento, desarrollo, interrelación, etc., de un determinado estadio; de esta forma, "la gráfica de un cierto problema, representa un modelo geométrico que nos permite evaluar dicho problema visualmente" (20) y cuya constitución está caracterizada (8) por un conjunto de vértices, V_j (puntos del diagrama asociados principalmente a un concepto y no a un punto físico) y a un conjunto de aristas e_k (lo que representa un segmento lineal que relaciona 2 vértices). De esta forma, un modelo puede ser representado por una gráfica.

Tal como un proceso de tratamiento de desechos orgánicos, la cinética de un reactor o la fórmula desarrollada de un catalizador. Lo que se pretende en resumidas cuentas con el uso de las gráficas, es establecer la estructura del concepto o fenómeno estudiado con la mayor claridad posible.

Para el desarrollo de los modelos gráficos, es necesario considerar la terminología utilizada en este campo y que será de uso común en este capítulo (8):

- Rizo o Lazo. Línea que sale de un vértice y regresa al mismo, representa la relación de un elemento consigo mismo (reflexividad).
- Grado de un vértice (i), (g_j). Número de segmentos lineales que concurren a un vértice (también llamado valencia de un vértice).
- Gráfica conexa. Es aquella donde todos los vértices es

tán relacionados al menos con otro (esto es, se puede ir de un vértice a otro, a través de los segmentos lineales).

- Paseo abierto o trayectoria. Es el que inicia y termina en diferentes vértices.
- Paseo cerrado o circuito. Es el que inicia y termina en el mismo vértice.
- Paseo euleriano. Trazo continuo que recorre toda la gráfica sin pasar por ninguna arista más de una vez.
- Gráficas isomórficas. Llamadas también equivalentes, son aquellas que tienen una correspondencia uno a uno entre sus componentes.
- Gráfica dirigida o digráfica. Aquella donde se indica la dirección de cada una de las aristas.
- Vértice fuente. Vértice de donde salen las aristas en una digráfica.
- Vértice sumidero. Aquel donde concurren los segmentos en una digráfica.

Hay otros términos muy empleados en el enfoque de gráficas, pero que serán descritos más adelante conforme se vayan requiriendo.

Las gráficas presentan algunas propiedades similares a la de los conjuntos, tales como la unión e intersección, propiedades que pueden ser usadas para operaciones con éstas.

4.2 CARACTERISTICAS A EVALUAR.

En esta etapa se hace referencia, a la relación existente entre las diferentes características que definen los elementos comparativos de los diferentes procesos.

La evaluación de cada caracterfstica para cada uno de los procesos de tratamiento, aparecen en la tabla siguiente:

TABLA 4.1

CARACTERIS- TICA	LAGUNAS DE ESTABILIZA- CION	LODOS AC - TIVADOS	FILTROS PERCOLADO- RES	BIODISCOS
1) Costos de construcción	Barato (en rela- ción con los otros procesos)	Costoso	Costoso (ligeramen- te menor al de L.A)	Mas Costoso
2) Costos de operación y mantenimien- to	Barato (para un MMGPD es 522730 US\$ hacia -- 1983)	Costoso (para un MMGPD es 169654 US\$ hacia -- 1983)	Costoso (similar a L.A.)	Costoso (para un MMGPD es 130743 US\$ hacia -- 1983)
3) Diseño	- Sencillo - Empírico	- Sencillo - Semiem- pírico	- Sencillo - Semiem- pírico	- Actualmen- te no exis- ten criteri- os bien de- finidos
4) Espacio que ocupa el proceso de tratamiento	Muchisimo espacio (para un MMGPD 5.8 hectarias)	Mucho espacio (para un MMGPD 2.3 hectarias)	Mucho espacio	Espacio regular

5) Tecnología	- Mínima	- Regular en el proceso convencional	- Regular	- No es compleja (pero aun paga regalías)
6) Necesidad de personal experimentado	- Mínimo	- Altos (ya que requiere de manejo de gran cantidad de lodo)	- Altos	- Mínimo (requiere de un mínimo de personal)
7) Muestreo	- sencillo y en cualquier punto	- Fijo, no se puede tomar en cualquier punto	- Fijo	- Sencillo se puede tomar en puntos intermedios
8) Aplicación industrial	Para cargas orgánicas - Textil - Lecheras - Otros	Para cargas orgánicas	Para cargas orgánicas	Para cargas orgánicas
9) Adaptabilidad	- Sujeta al espacio disponible	- Regular	- Regular	- Buena
10) Requerimientos de energía	- Mínimos (el principal proveedor es el sol)	- Mucha (2.58 HPH/MGPM)	- Regular	- Regular (generalmente un 28% menor que en L.A.)

11) Molestias producidas	<ul style="list-style-type: none"> - Malos olores - Ocasionalmente hay moscas 	<ul style="list-style-type: none"> - Malos olores - Ruido 	<ul style="list-style-type: none"> - Encharcamientos 	<ul style="list-style-type: none"> - De este tipo ninguno
12) Eficiencia (medida como % de remoción de DBO)	- Variable 10 - 90 %	90 - 95 %	70-75 %	Puede llegar hasta 99%
13) Experiencia del proceso en México	- Amplia	-Amplia	- Suficiente	- Ninguna
14) Carga volumétrica	0.19-0.4 <u>Kg de DBO</u> m ³	0.5-1.5 <u>Kg de DBO</u> m ³	Similar que L:A	Similar que L.A.
15) Procesos antecedentes	- Ninguno	<ul style="list-style-type: none"> - Rejillas - Desarenadores - Sedimentador 	<ul style="list-style-type: none"> - Rejillas - Desarenadores - Sedimentador 	- Pretratamiento en general
16) Otros parámetros a controlar	<ul style="list-style-type: none"> - Luminosidad -Infiltraciones - Lluvias - Viento 	<ul style="list-style-type: none"> - Aireación - Agitación 	<ul style="list-style-type: none"> - Profundidad - Tamaño del trozo de roca 	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad de giro - Tamaño del disco - Area sumergida

<p>17) Infraestructura requerida</p>	<p>- Mínima</p>	<p>- Regular</p>	<p>- Regular</p>	<p>- Regular</p>
<p>18) Problemas que se presentan comunmente</p>	<p>- Por estar al medio ambiente, se presentan by-pass, alteraciones por lluvia insolación etc.</p>	<p>- Tendencia a que los lodos floten - Demanda alta de O₂ - Edad de los lodos - no se produce calidad intermedia del efluente</p>	<p>- Problemas de encharcamientos - Obstrucciones en las rocas - Rendimiento variable</p>	<p>- Por su voluminosidad hay problemas en su transporte e instalación</p>

Cada una de las características establecidas en el cuadro anterior, puede tener cierta relación o influencia con las demás características. Cada característica será definida como V_1, V_2, \dots, V_{18} . Dependiendo del número asignado de ésta en la tabla anterior.

La relación existente entre las características será cuantificada, y los valores resultantes producirán una matriz que será única para cada proceso (aunque similar a los demás procesos en la relación establecida). De la matriz producida, se desarrollarán los modelos gráficos requeridos que nos permitirán evaluar mas racionalmente las características ya definidas para cada proceso de tratamiento.

4.3 DESARROLLO DE MODELOS GRAFICOS.

Al analizar la Tabla (4.1) puede formularse la pregunta, ¿Qué características son repetitivas?, esto es, puede ser por ejemplo que la característica V_3 esté contenida en la V_5 . Por otro lado, puede plantearse la pregunta ¿Qué lugar entre estas características ocupa V_{12} , que en primer instancia parece representar el objetivo del proceso?. Para analizar esto y - - otras cuestiones, desarrollaremos nuestro modelo, fijando primero el grado de relación que (a un criterio muy personal) puede existir entre las características, (si el criterio no es adecuado o congruente, se puede detectar en el modelo establecido).

Consideraremos cuatro tipos de relación:

- Ninguna (0)
- Débil (1)
- Fuerte (2)
- Indispensable (3)

4.3.1 MODELO GRAFICO PARA EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACION.

Una vez definidos los grados de relación, procedemos a - construir una matriz que nos permita relacionar cada característica con las 17 restantes:

Matriz para el proceso de tratamiento de lagunas de estabilización.

	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
V 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
V 2		1	1	0	0	0	1	1	2	0	0	0	1	0	0	2	2	1
V 3			1	2	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1
V 4				1	0	0	0	3	2	1	2	3	1	1	0	2	1	1
V 5					1	0	0	2	2	1	0	2	0	1	0	1	0	0
V 6						0	0	1	2	2	2	1	3	1	0	2	2	1
V 7							2	1	2	0	2	1	2	1	0	3	1	2
V 8								2	1	0	0	1	3	1	0	2	1	3
V 9									3	2	2	2	2	2	0	1	2	2
V 10										1	0	0	1	0	0	2	2	1
V 11											0	1	2	1	0	2	1	1
V 12												0	2	2	0	2	1	0
V 13													1	1	0	2	2	3
V 14														0	0	1	2	2
V 15															0	2	2	1
V 16																0	0	0
V 17																	2	2
V 18																		2

Por simetría esta parte ya está considerada en la parte superior derecha

RELACION REFLEXIVA.

La relación de una característica consigo misma (rizo o relación reflexiva) carece en nuestro caso de sentido.

De acuerdo con la gráfica anterior, tenemos que el grado de cada vértice es:

$g(V_1) = 2$	$g(V_7) = 4$	$g(V_{13}) = 2$
$g(V_2) = 1$	$g(V_8) = 3$	$g(V_{14}) = 3$
$g(V_3) = 2$	$g(V_9) = 4$	$g(V_{15}) = 0$
$g(V_4) = 3$	$g(V_{10}) = 2$	$g(V_{16}) = 4$
$g(V_5) = 5$	$g(V_{11}) = 2$	$g(V_{17}) = 2$
$g(V_6) = 3$	$g(V_{12}) = 3$	$g(V_{18}) = 3$

La sumatoria de los grados de cada vértice, nos dará el número de aristas (e), de nuestra gráfica:

$$\sum g(V_i) = 2 e \quad \text{--- (4.1)}$$

$$\sum g(V_i) = 2+1+2+3+5+3+4+3+4+2+2+3+2+3+0+4+2+3 = 48$$

$$e = 48/2 = 24 \text{ aristas.}$$

En la Fig. (4.1) podemos observar que:

- a) Es una gráfica no conexa (puesto que se tiene el vértice V_{15}).
- b) La gráfica consta de dos componentes:
 - b.1) Componente (1): 17 vértices y 24 aristas
 - b.2) Componente (2): 1 vértice y 0 aristas (Vértice V_{15})
- c) Encontramos un vértice suspenso (pendant), que es V_{15} (en nuestro caso consideramos $g(V_{15}) = 0$ por convencionalismo, pero se considera que un vértice suspenso tiene por definición grado 1).

- d) Después de establecer las relaciones indispensables, se dibujaron tan solo 16 aristas de relación fuerte (las relaciones asignadas con el número 2 en la matriz) puesto que las demás están implícitas por la propiedad de transi tividad.
- e) La relación (V_6, V_7) que se dibujó, está implícita por las relaciones indispensables (V_6, V_{18}) y (V_{18}, V_7) ; sin embargo, esta cuerda se trazó para mantener la planaridad en la gráfica.

Al principio de este capítulo, se comentó que la pretensión de una gráfica, es establecer con claridad la estructura de un concepto o fenómeno estudiado. Lo que implica que los componentes del modelo estén en un solo plano esquemático que corresponde conceptualmente a un solo contexto (21). Lo anterior significa que la representación esquemática de un determinado proceso, pueden dividirse en partes (áreas de síntesis) - en una gráfica, y que cada una de estas partes o áreas de síntesis tendrá un significado especial dentro del contexto general de la gráfica.

Para definir con claridad estas áreas de síntesis, es necesario (en la medida que sea posible) evitar el cruce de líneas en las gráficas. De esta manera, cuando en una representación esquemática no existe este cruce de líneas, se dice que la gráfica es plana. En el modelo representado en la Fig. 3.2 los vértices fueron "acomodados" en forma tal, que la representación de la figura es plana (la arista entre los vértices V_6 y V_7 se dibujó aunque ya estaba implícita, debido a que con esta cuerda queda implícita la relación V_6 y V_{11} de la siguiente forma (V_6, V_7) , (V_7, V_{14}) y (V_{14}, V_{11}) , sino se hubiera colocado esta cuerda al trazarse la cuerda (V_6, V_{11}) se hubiera per-

Esta orientación se desarrolló de la siguiente manera - -
 (ejemplo para el vértice V_9 [adaptabilidad]):

- a) Relación (V_5, V_9); la tecnología del proceso influye en la adaptabilidad de éste, (por esto la flecha va de V_5 a V_9).
- b) Relación (V_1, V_9); se considera que la adaptación del proceso influye sobre los costos de construcción.

Y de esta forma para todos los vértices.

En la digráfica anterior, podemos desarrollar un balance de los grados de los vértices, considerando como valores positivos las aristas que salen de un vértice [$g^+(V_i)$] y como negativos los que entran [$g^-(V_i)$] de tal forma que:

TABLA 4.2

(V_i)	$g^+(V_i)$ salen	$g^-(V_i)$ entran
V_1	0	2
V_2	0	1
V_3	1	1
V_4	2	1
V_5	3	2
V_6	1	2
V_7	1	3
V_8	3	0
V_9	2	2
V_{10}	0	2
V_{11}	0	2
V_{12}	0	3
V_{13}	2	0
V_{14}	2	1
V_{16}	4	0
V_{17}	1	1
V_{18}	<u>2</u>	<u>1</u>
	24	24

Lo cual indica que es una gráfica balanceada (lógicamente ambos lados deben ser iguales); es a partir de aquí, que el análisis del proceso por medio de un modelo gráfico empieza a justificarse.

De la tabla (4.2) se puede observar lo siguiente:

-- En los vértices V_8 , V_{13} y V_{16} solamente salen artistas, pero ninguna entra [$g^-(V_i) = 0$] lo cual significa que son vértices fuente de esta gráfica, es decir, "son los conceptos sobre el cual se apoyan o emanan los demás" (21), en nuestro caso representan las características que mínimamente deben conocerse con exactitud, para poder desarrollar el proceso de tratamiento de lagunas de estabilización; estas características son:

V_8 = Aplicación industrial (a que industria se aplica, textil, alimenticia, etc.).

V_{13} = Experiencia del proceso en México.

V_{16} = Parámetros a controlar, tales como, luminosidad, lluvias, viento, etc., es decir debe conocerse perfectamente el ambiente que rodea al proceso.

-- En los vértices V_1 , V_2 , V_{10} , V_{11} y V_{12} las aristas de la gráfica solo entran a este y ninguno sale de ellos, lo cual indica que son vértices sumideros. Estos representan las características de conclusión del proceso y por lo tanto las características que evalúan nuestros procesos, estas son [$g(V_i)$].

V_1 = Costos de construcción.

- V_2 = Costos de operación y mantenimiento.
- V_{10} = Requerimientos de energía.
- V_{11} = Control de molestias producidas (al respecto de este parámetro, considerar lo que se dice más adelante).
- V_{12} = Eficiencia.

Considerando y analizando lo anterior, puede visualizarse en una representación gráfica las contradicciones en el razonamiento (si es que las hay); esto resulta importante, por ejemplo en un estudio de toma de decisiones (puesto que los valores asignados a los criterios considerados, pueden ser contradictorios o los pesos asignados a cada relación puede que no sean los adecuados). En este caso, puede considerarse que las características consideradas como fuente o sumidero adquieren una importancia vital en la selección de un proceso.

A través de las gráficas, también puede observarse la posición que juegan las demás características con respecto al proceso en sí y a nuestras características fuente y sumidero.

Las aristas que forman nuestra gráfica A son:

- | | | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|
| (V_1, V_9) | (V_4, V_{12}) | (V_6, V_7) | (V_8, V_9) |
| (V_1, V_{16}) | (V_5, V_9) | (V_6, V_{16}) | (V_8, V_{14}) |
| (V_2, V_4) | (V_5, V_{10}) | (V_6, V_{18}) | (V_{10}, V_{16}) |
| (V_3, V_8) | (V_5, V_{11}) | (V_7, V_{14}) | (V_{11}, V_{14}) |

De los árboles de expansión, puede decirse que se definen para gráficas conexas debido a su conectividad. Si "e" representa el número de ramas, "k" el número de componentes en una gráfica y "n" el número de vértices entonces:

$$e \geq n - k \quad (4.2)$$

Luego, el número de ramas de los árboles de expansión de la gráfica A, se le denominará rango (r):

$$r = n - k \quad (4.3)$$

Donde para nuestro caso $k = 1$, si consideramos el vértice aislado como otra gráfica, $k = 2$.

Entonces:

$$r = 17 - 1 = 16 \text{ ramas}$$

El número de ramas totales en la gráfica A es:

$$e = 24 \quad \text{tal que; } 24 \geq 17 - 1$$

Si denominamos cuerdas a las aristas eliminadas para formar el árbol, estaremos definiendo la nulidad de A (representada por \mathcal{M}), la cual será:

$$\mathcal{M} = e - n + k$$

$$\mathcal{M} = 24 - 17 + 1 = 8 \text{ cuerdas}$$

Es decir se suprimieron 8 aristas. Lógicamente el rango - mas la nulidad darán el número total de aristas de la gráfica - que se descompuso para formar el árbol.

Otra propiedad característica de los árboles es su centro y su excentricidad, el vértice con menor excentricidad se le denomina centro de la gráfica (puede haber mas de un centro) y la excentricidad hace referencia a la distancia (medida por el número de ramas) entre un determinado vértice y el vértice más alejado a éste. El proceso más sencillo para encontrar el centro, consiste en eliminar todos los vértices suspensos del árbol, después los que queden del siguiente árbol y así sucesivamente:

FIGURA 4.5

1a. eliminación

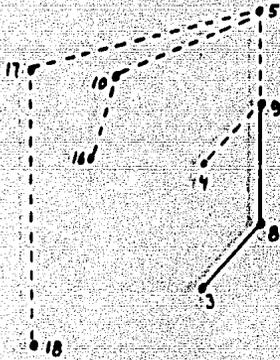
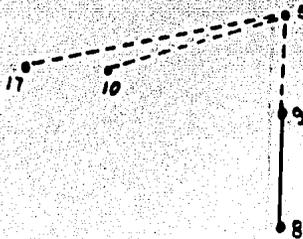


FIGURA 4.6

2a. eliminación



3a. eliminación

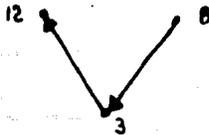


Por lo tanto hay dos centros con una excentricidad de 4, que es la menor excentricidad que presenta algún vértice en nuestro árbol. Debe considerarse que una gráfica determinada, no solamente tiene un árbol, sino que hay varios, cada uno de éstos permite analizar diversas relaciones. Todos los árboles de expansión de una gráfica pueden generarse partiendo de un árbol del que se eliminan ramas y se agregan cuerdas, lo anterior significa que una cuerda para un árbol determinado, sea una rama para otro.

Comentando el árbol de expansión que hemos considerado:

- No se ha considerado la orientación del árbol, si se considera, puede analizarse la "trayectoria de influencia" de un vértice fuente a otra característica, así por ejemplo V_8 (aplicación industrial) con respecto a un requerimiento fundamental (vértice sumidero) V_{12} (eficiencia):

FIGURA 4.8

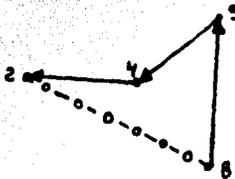


De acuerdo a esta figura deberá darse atención especial al diseño (V_3) desarrollado. De la combinación de estas ramas podemos inferir una relación (V_8, V_{12}), y de esta manera formaríamos un circuito (a dicho circuito se le denominará circuito fundamental). El circuito fundamental está constituido por dos o más relaciones fuertes (ramas) y una relación inferida (cuerda) que en nuestro caso sería (V_8, V_{12}), (nótese aquí una de las importancias del análisis gráfico, la relación (V_8, V_{12}) de hecho la consideramos en la matriz, pero no la pusimos porque estaba inferida por transitividad, sin embargo, sino, hubiéramos encontrado con una falta de congruencia en nuestro criterio).

Este circuito fundamental da origen a un nuevo concepto (que representaría la síntesis de los conceptos y relaciones de V_8, V_3 y V_{12}). De aquí que, en un modelo conceptual, los circuitos fundamentales representan áreas de síntesis, que se pueden detectar fácilmente cuando la figura es plana.

Otro caso muy interesante es el circuito fundamental V_8, V_9, V_4, V_2 . Nótese que en la siguiente figura (4.9), la relación inferida es la denotada por la línea punteada (V_8, V_2).

FIGURA 4.9



En este caso, tenemos nuevamente que el vértice fuente es V_8 (aplicación industrial) y el vértice sumidero es V_2 (costos de operación y mantenimiento), resulta hasta cierta medida lógico, que los costos de operación y mantenimiento, dependan - del tipo de industria al que se a aplicado el proceso de trata- miento de lagunas de estabilización, lo cual quizás, le reste- un poco de importancia a la relación inferida de la figura - - (4.9) (esto es, en primera instancia, no parece justificable - dibujar una gráfica para sacar esta inferencia), sin embargo, no parece tan lógico que esto se deba principalmente a V_9 (la- adaptabilidad del proceso a las condiciones tenidas) y a V_4 -- (espacio que ocupa el proceso de tratamiento) y no al desecho industrial en sí. Este es el concepto que se ha obtenido de- esta área de síntesis, y que visto fuera de la gráfica, no pa- recería tan lógico (por lo menos a primer instancia).

Otras características importantes de analizar son la V_5 - (tecnología) y la V_9 (adaptabilidad) por constituir los centros del árbol de expansión "...Previo jerarquización, pueden repre- sentar un tema central (de equilibrio), por ejemplo, en cuanto a valores, o a grado de dificultad, etc." (8) (nótese que en la mayoría de casos, que para ir de un vértice fuente a uno sumide- ro, se pasa por uno de ellos) es decir, representan las vías de enlace mas "concurridas" entre los vértices (como se pueden ver en la figura 4.3 que es una representación orientada).

Finalmente, en este análisis gráfico se han obtenido como características fundamentales y por tanto de mayor peso, las - características fuente (V_8, V_{13}, V_{16}), centro (V_5, V_9) y sumi- dero (V_1, V_2, V_{10}, V_{11} y V_{12}).

4.3.2 MODELO GRAFICO PARA EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE Lodos ACTIVADOS.

En el desarrollo de este modelo como en los otros dos posteriores, seguiremos el mismo orden que se siguió en el proceso de lagunas de estabilización:

- Construimos nuestra matriz que nos servirá de base para desarrollar nuestro modelo gráfico, relacionando las características que aparecen en la tabla 4.1, pero considerando ahora la columna para lodos activados:

FIGURA 4.10

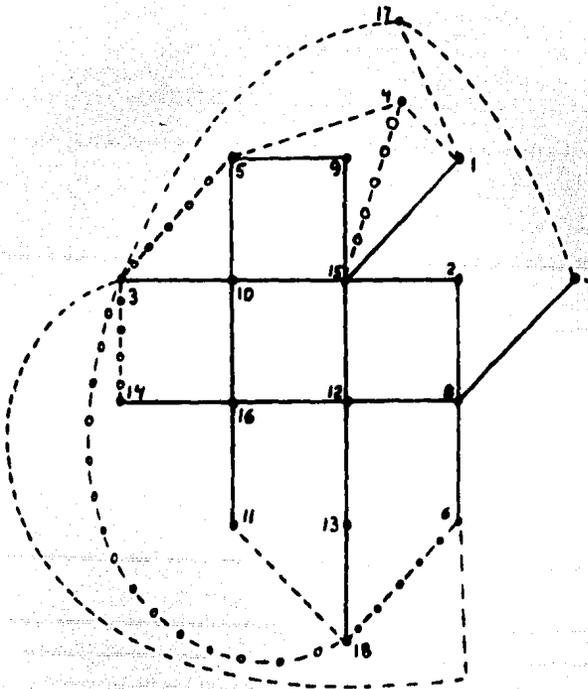
	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
V 1	0	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2	3	2	2	0		
V 2			1	2	2	2	0	3	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	
V 3				1	2	2	0	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	
V 4					2	0	0	2	2	2	0	1	1	1	2	0	2	1	
V 5						2	1	2	3	3	1	2	2	2	1	2	2	2	
V 6							2	3	2	2	1	2	3	2	2	2	1	2	
V 7								3	1	1	0	1	2	1	0	1	2	1	
V 8									2	2	2	3	2	2	2	1	2	2	
V 9										1	1	1	2	2	3	1	2	1	
V 10											0	2	2	2	3	3	1	1	
V 11												0	1	2	1	3	1	2	
V 12													3	2	3	3	1	2	
V 13														2	1	1	0	3	
V 14															2	3	1	2	
V 15																0	2	2	
V 16																	2	1	
V 17																		1	
V 18																			1

Podría esperarse, que las relaciones entre las características mencionadas fueran similares para los procesos de tratamiento.

Pero no es así, por ejemplo, la columna "15" de las matrices para lagunas de estabilización y lodos activados, es totalmente diferente. Mientras que en las lagunas el vértice V_{15} - (procesos antecedentes) no tiene ninguna influencia en las demás características dando origen a un vértice suspenso (como se muestra en la figura 4.2), en el proceso de lodos activados, forma fuertes enlaces con las demás características.

De la misma forma que en la sección anterior, procedemos a construir nuestro modelo gráfico, que representará esquemáticamente los criterios expresados en la matriz anterior, considerando solo las relaciones fuertes (2) e indispensables (3) y sustrayendo las relaciones fuertes que queden implícitas por la propiedad de transitividad que presentan las gráficas (se sustraen las relaciones fuertes no las indispensables):

FIGURA 4.11



Como ya se comentó, las líneas continuas son las relaciones indispensables (aparecen marcadas con el número 3 en la matriz) estas relaciones no se pueden sustraer, siempre se tienen que representar.

- Las líneas discontinuas (relaciones fuertes) se representan cuando no estén inferidas por transitividad (aunque se colocan algunas ya implícitas, para mantener la planaridad tal como se explicó en la sección anterior).

Las relaciones fuertes descritas así (-o-o-o-) representan relaciones que están implícitas por otros enlaces, sin embargo se colocan para servir como "puente" entre otras características que al conectarse directamente, cruzarían otras líneas, rompiendo la planaridad de la representación gráfica, como la relación (3,14), (3,5), etc.

Observando la gráfica anterior tenemos que:

$$\begin{array}{llll}
 g(V_1) = 3 & g(V_6) = 3 & g(V_{11}) = 2 & g(V_{16}) = 4 \\
 g(V_2) = 2 & g(V_7) = 2 & g(V_{12}) = 4 & g(V_{17}) = 3 \\
 g(V_3) = 6 & g(V_8) = 4 & g(V_{13}) = 2 & g(V_{18}) = 4 \\
 g(V_4) = 3 & g(V_9) = 2 & g(V_{14}) = 2 & \\
 g(V_5) = 4 & g(V_{10}) = 4 & g(V_{15}) = 6 &
 \end{array}$$

$$\sum g(V_i) = 3+2+6+3+4+3+2+4+2+4+2+4+2+2+6+4+3+4 = 60$$

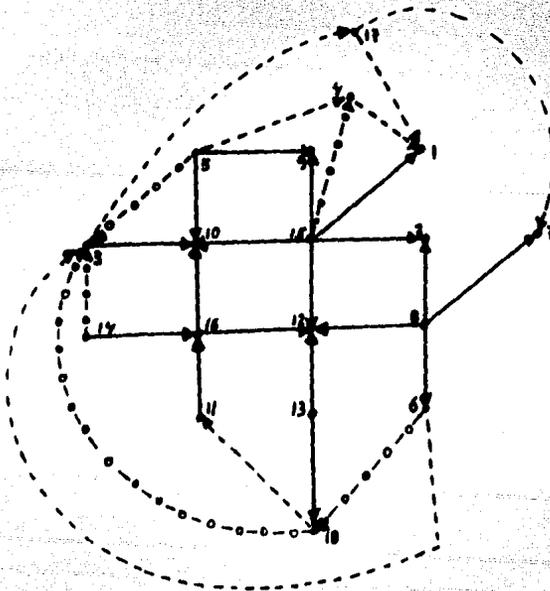
Puesto que:

$$\sum g(V_i) = 2e \quad e = 60/2 = 30 \text{ aristas.}$$

- Hay 30 aristas, que representan 12 relaciones fuertes y 18 relaciones indispensables.
- La gráfica es conexa, de tal forma que se puede ir de un vértice a otro a través de los enlaces.
- La gráfica es plana, de tal manera que ningún enlace se cruza.
- La forma de la gráfica que representa al modelo no es la única posible, pueden tener otras formas, siempre y cuando cumplan con las propiedades, de que la gráfica sea conexa, plana, etc. (esta diferencia se debe principalmente al cambio de líneas de relaciones fuertes por otras, y al cambio de lugar de los vértices).

Representando a la gráfica en forma orientada tal como se desarrolló en la sección anterior tenemos que:

FIGURA 4.12



La orientación se estableció de la misma forma que en la sección anterior. Así por ejemplo, para el vértice V_1 (costos de construcción):

- Es influenciado por el vértice V_4 (espacio que ocupa el proceso de tratamiento), es decir, se considera que el costo de construcción va variando con el espacio disponible (por otro lado si se considera en los costos de construcción el costo del terreno a ocupar, el efecto se hace aún más considerable, a grado tal, que se podría formar una relación indispensable).
- Es influenciado por el vértice V_{15} (procesos antecedentes). Un sistema de lodos activados requiere de procesos antecedentes, tales como, rejillas, desarenadores y un sedimentador primario, es evidente que estos equipos influyen directamente sobre los costos de construcción y no a la inversa.
- Es influenciado por el vértice V_{17} (infraestructura requerida). La independencia de los costos de construcción, dependerá de los recursos con que se cuente en el lugar, de aquí que los costos de construcción, también sean influenciados por esta característica y no al contrario.

De manera similar, se procedió a "orientar" todas las relaciones establecidas en el modelo gráfico, hasta formar la figura 4.12.

Al igual que en la sección anterior, procedemos a establecer nuestro balance de los grados de los vértices, de la forma que se muestra la tabla 4.3.

TABLA 4.3

(Vi)	$g^+ (Vi)$ salen	$g^- (Vi)$ entran
v ₁	0	3
v ₂	0	2
v ₃	2	4
v ₄	1	2
v ₅	4	0
v ₆	2	1
v ₇	0	2
v ₈	4	0
v ₉	0	2
v ₁₀	0	4
v ₁₁	1	1
v ₁₂	0	4
v ₁₃	2	0
v ₁₄	2	0
v ₁₅	6	0
v ₁₆	2	2
v ₁₇	2	1
v ₁₈	2	2
	<u>30</u>	<u>30</u>

El balance nos indica los vértices fuente y sumidero para el proceso de tratamiento de lodos activados,

Los vértices fuente (cuya característica ya fue comentada en la sección anterior), definidos como aquellos que cumplen la condición de $g^-(Vi)=0$ son de acuerdo al balance:

- V₈ Aplicación industrial (lo cual coincide con el proceso de lagunas de estabilización).
- V₅ Tecnología (lo cual nos indica que en el establecimiento del proceso de lodos activados, es necesario considerar los requerimientos tecnológicos necesarios para su desarrollo).
- V₁₃ Experiencia del proceso en México (que también se considera fuente en el proceso de lagunas y su influencia puede considerarse sobre todos los puntos del proceso).
- V₁₄ Carga volumétrica (es fuente, puesto que su influencia define las condiciones de operación del proceso).
- V₁₅ Procesos antecedentes (esta característica fuente, debe conocerse con exactitud, pues es la que incide directamente sobre la mayor cantidad de características).

Las características que permitirán evaluar el proceso o vértices sumideros, son las definidas como $(g^+(V_i)=0)$ y son las siguientes:

- V₁ Costos de construcción (representan un criterio esencial en la evaluación de un proceso).
- V₂ Costos de operación y mantenimiento (idem).
- V₇ Muestreo (las facilidades en el muestreo, puede considerarse como una ventaja en un proceso, sin

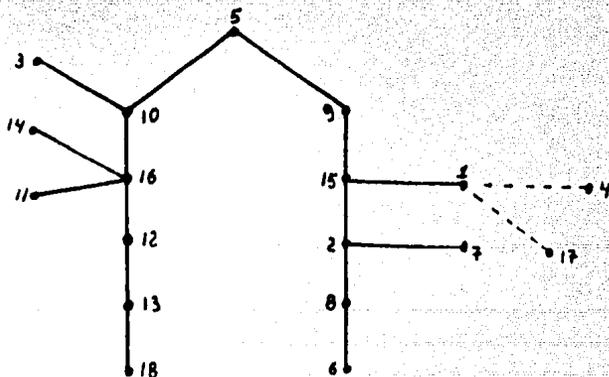
embargo, no constituyen un carácter indispensable).

- V_9 Adaptabilidad (por las características del proceso, constituye un parámetro de forzosa evaluación, puesto que ocupa mucho espacio, causa malos olores, mucho ruido, etc.).
- V_{10} Requerimientos de energía.
- V_{12} Eficiencia (medida como % de DBO removida).

Comparando los vértices fuente y sumidero de este proceso con el de lagunas de estabilización, puede observarse que en la evaluación del proceso V_1 y V_2 , constituye un aspecto determinante en este análisis.

Para la formación del árbol de expansión de este proceso, eliminamos algunas de las aristas que den lugar al circuito, pero que mantengan la gráfica de un componente (es decir que no la partan en dos). Sustrayendo las relaciones (3,6), (3,18) (3,5), (3,17), (3,14), (4,5), (4,15), (6,18), (11,18), (7,17), que son relaciones directas y las indispensables (8,12), (10, 15) y (12,15). Formamos nuestro árbol de expansión de acuerdo a la figura (4.13)

FIGURA 4.13



Las ramas de este árbol de expansión, constituyen la parte fundamental de la gráfica, el árbol establece "una especie de esqueleto" (8) de la gráfica anterior, representa las relaciones de máximo apoyo de toda la figura en un contexto determinado (debe recordarse que en la sección anterior se comentó que una gráfica tiene varios árboles) y de él pueden inferirse las demás relaciones.

El rango de este árbol de expansión es:

$$r = n - k$$

$n = 18$ vértices y $k = 1$ componente (gráfica conexa)

$$r = 18 - 1 = 17 \text{ ramas.}$$

La nulidad μ del árbol (cuerdas o aristas eliminadas), será:

$$\mu = e - n + k \text{ Donde: } e=30 \text{ aristas de la gráfica}$$

$$\mu = 30 - 18 + 1 = 13 \text{ (se eliminaron 13 aristas)}$$

Como se vió en la sección anterior, además de los vértices fuente y sumidero, el vértice o vértices centro tienen gran importancia por las características ya mencionadas y su obtención se hará de la misma manera, eliminando sucesivamente los vértices suspensos del árbol.

1a. eliminación.

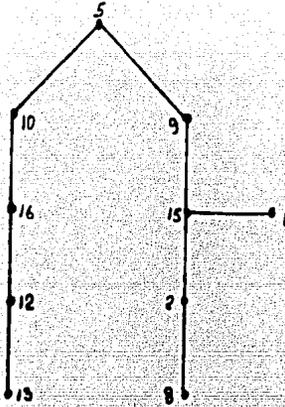


FIGURA 4.14

2a. eliminación

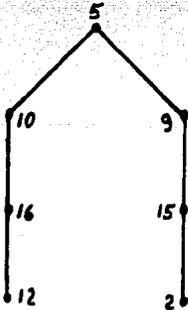


FIGURA 4.15

3a. eliminación

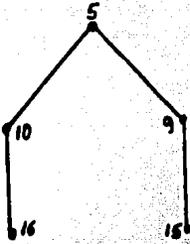
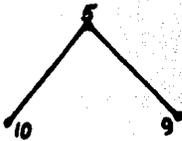


FIGURA 4.16

4a. eliminación

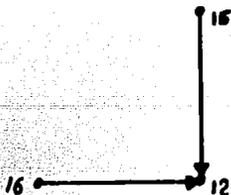


Por lo tanto, tenemos un centro con una excentricidad de 5 (puesto que la quinta eliminación dejaría sólo al vértice V_5) que presenta la menor excentricidad entre cualquiera de los - vértices dibujados. De la sección anterior, tenemos que sus - vértices centros fueron (5) y (9), por lo que en ambos casos - tenemos que la tecnología del proceso constituye la caracterís- tica central de equilibrio, para ambos procesos de tratamiento,

Orientando nuestro árbol de expansión (dándole dirección a las relaciones) y analizando en especial algunas áreas de síntesis tenemos lo siguiente:

- Se pueden formar muchos circuitos fundamentales - bajo la condición de que estén formados por dos ramas y una relación inferida (1 cuerda),
- Estos circuitos, los podemos formar con tres o más vértices y su formación constituye un nuevo concepto surgido de las características que lo forman.
- Las relaciones más interesantes de analizar, son - las que tienen un valor asignado de cero, puesto - que éstas no fueron consideradas en un criterio -- inicial.
- Considérese la siguiente área de síntesis que se - podría formar con los vértices V_{15} , V_{12} , V_{16} .

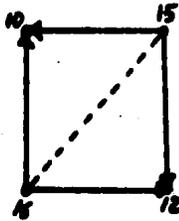
FIGURA 4.17



Ambas relaciones son indispensables, por esto, los procesos antecedentes (V_{15}) y algunos parámetros a controlar tales como aireación y agitación (V_{16}) influyen directamente sobre la eficiencia del proceso (V_{12}). A primera vista parece que realmente no existe relación entre V_{15} y V_{16} (en la matriz del pro-

so de lodos activados a la relación V_{15} y V_{16} se le asignó un valor de cero). Sin embargo, si eliminamos del proceso de tratamiento las unidades antecedentes tales como rejillas, desarenadores y el sedimentador primario, no solo la eficiencia se ve afectada, sino que los elementos de agitación y aireación, independientemente de que quedarían insuficientes, incrementarían sus requerimientos energéticos; lo cual se refleja en el modelo gráfico de la figura 4.12 y se presenta en la siguiente figura:

FIGURA 4.18



Y precisamente, V_{15} y V_{16} presentan relaciones indispensables que influyen directamente sobre V_{10} que es la característica de los requerimientos energéticos, por lo que en realidad a la relación V_{15} y V_{16} se le debería asignar un valor de 2, que aunque no marca una relación indispensable, si constituye una relación fuerte entre ambas características.

Para finalizar cabe tener presente que las características fundamentales y por tanto de mayor peso para este proceso de tratamiento son:

- a) Vértices fuente: Características V_5 , V_8 , V_{13} , V_{14} y V_{15} .

- b) Vértices sumidero: Características V_1, V_2, V_9, V_{10} y V_{12} .
- c) Vértice centro: Característica V_5 .

4.3.3 MODELO GRAFICO PARA EL PROCESO DE TRATAMIENTO DE FILTROS PERCOLADORES.

Para construir la matriz de este proceso de tratamiento, también empleamos la tabla 4.1, pero basando nuestro criterio de asignación de valores, en la columna de filtros percoladores:

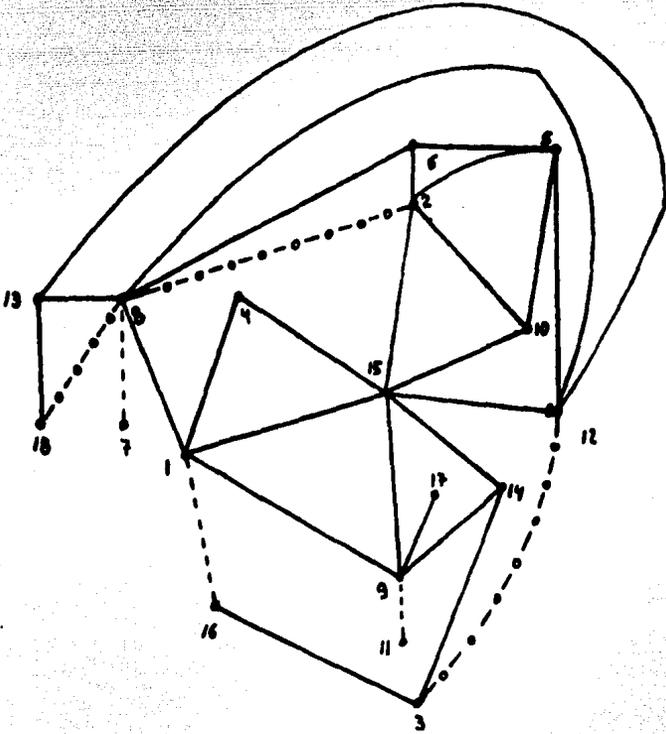
FIGURA 4.19

	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	v	
	1	2	3	4	5	6	7	3	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
v 1		1	2	3	2	0	0	3	3	1	1	1	2	2	3	2	2	1	
v 2			2	2	3	3	1	2	2	3	1	2	2	2	3	2	1	2	
v 3				2	2	2	1	2	2	2	1	2	2	3	2	3	2	2	
v 4					2	0	0	2	2	1	1	2	1	2	3	2	1	2	
v 5						3	1	2	2	3	2	3	2	2	2	2	1	2	
v 6							1	3	2	1	1	2	0	2	2	2	1	2	
v 7								2	1	0	0	1	2	0	1	2	1	2	
v 8									2	2	2	3	3	2	2	2	1	2	
v 9										2	2	1	2	3	3	2	3	2	
v 10											0	1	2	2	3	1	2	2	
v 11													1	2	2	2	2	1	1
v 12														3	2	3	2	2	2
v 13															2	1	1	1	3
v 14																3	2	1	1
v 15																	1	2	1
v 16																		1	2
v 17																			1
v 18																			

La característica específica de esta matriz a diferencia de las dos anteriores, es de que presenta una mayor cantidad de relaciones indispensables (asignación 3), lo que significa una mayor interrelación entre sus características.

De la matriz, se construye el modelo gráfico correspon- -
diente, considerando que la planaridad del gráfico, presentará
mayor claridad en el análisis gráfico del proceso de tratamien
to:

FIGURA 4.20



Nuevamente las relaciones fuertes dibujadas así (-o-o-o-o-) son relaciones que están implícitas en otras relaciones, pero se ponen para mantener la planaridad, y así evitar poner otras líneas de relación fuerte, que cruzarían la gráfica rompiendo la planaridad.

Desglosando la gráfica para obtener el número total de aristas tenemos:

$$\begin{array}{llll}
 g(V_1) = 5 & g(V_6) = 3 & g(V_{11}) = 1 & g(V_{16}) = 2 \\
 g(V_2) = 5 & g(V_7) = 1 & g(V_{12}) = 5 & g(V_{17}) = 1 \\
 g(V_3) = 3 & g(V_8) = 7 & g(V_{13}) = 3 & g(V_{18}) = 2 \\
 g(V_4) = 2 & g(V_9) = 5 & g(V_{14}) = 3 & \\
 g(V_5) = 4 & g(V_{10}) = 3 & g(V_{15}) = 7 &
 \end{array}$$

$$\sum g(V_i) = 5+5+3+2+4+3+1+7+5+3+1+5+3+3+7+2+1+2 = 62$$

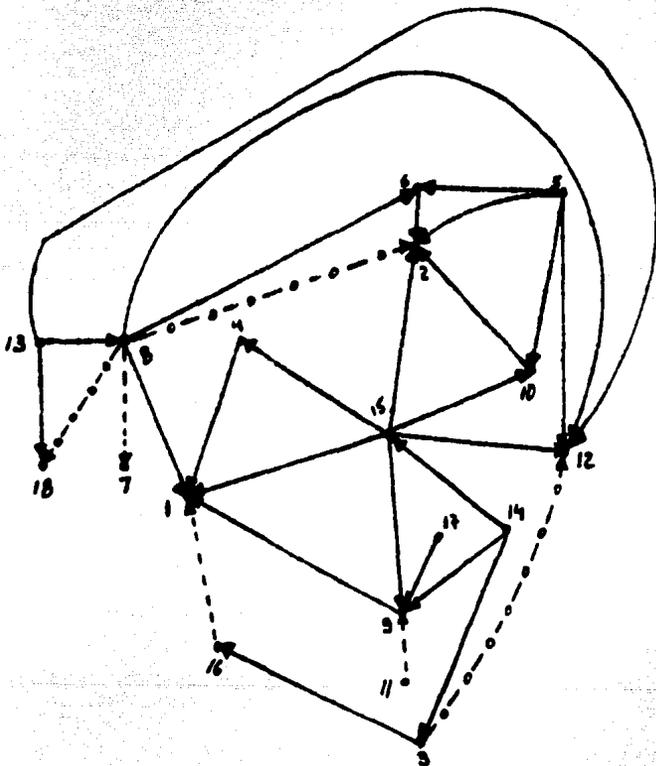
$$\sum g(V_i) = 2e \quad e = 62/2 = 31 \text{ aristas.}$$

- Hay 31 aristas, que representan 25 relaciones indispensables y 6 relaciones fuertes.
- La gráfica es conexa.
- La gráfica es plana.
- La forma de la gráfica podría ser diferente, pero las relaciones que conforman al modelo no, por lo que el análisis desarrollado en las áreas de síntesis sería el mismo aunque la forma de la gráfica sea diferente "no interesa la forma en que se arreglen los vértices, ni la forma geométrica que tome

la gráfica, Lo importante es la relación entre - los conceptos y la manera en que se integran" (21).

Orientando la gráfica, para establecer la forma que tendrá la relación (creación de la digráfica), en base a la figura 4.20 tenemos:

FIGURA 4.21



El desarrollo de la orientación de la gráfica, se realizó en forma análoga a los dos procesos anteriores. En este caso, - desarrollaremos la orientación en el vértice (1) que al igual - que en los dos procesos de tratamiento analizados anteriormente

constituye un vértice sumidero (en este caso a diferencia de los dos anteriores, obsérvese su dependencia "indispensable" con un mayor número de vértices).

- Relación (V_1, V_4). Lógicamente V_4 (espacio que ocupa el proceso de tratamiento) influye sobre V_1 (costos de construcción) sobre todo si se consideran los costos por concepto de terreno en el proceso de construcción del sistema de filtros percoladores.
- Relación (V_1, V_8). V_8 (aplicación industrial) influye sobre (V_1) puesto que las condiciones requeridas por el proceso de tratamiento para su construcción, depende del tipo de industria, ya sea si es textil, de enlatados, etc.
- Relación (V_1, V_9). La adaptabilidad del proceso (V_9) influye sobre (V_1), puesto que, entre más adaptable sea el proceso, menor acondicionamiento tendrá que hacer a las condiciones que ya se tenga en una industria, por ejemplo terreno, red eléctrica, etc.
- Relación (V_1, V_{15}). Lógicamente los costos de construcción (V_1) son influenciados por los procesos antecedentes (15), los sedimentadores, desarenadores, etc., incrementan estos costos.
- Relación (V_1, V_{16}). Cuando existen otros parámetros a controlar afines al proceso (V_{16}), se requiere equipo para su control, el cual influye en los costos de construcción (V_1).

De esta forma se procedió a orientar toda la gráfica representada en la figura 4.21.

El balance de vértices para la figura 4.21, está establecida en la siguiente tabla:

TABLA 4.4

(v_i)	$g^+(v_i)$ salen	$g^-(v_i)$ entran
v_1	0	5
v_2	0	5
v_3	2	1
v_4	1	1
v_5	4	0
v_6	1	2
v_7	0	1
v_8	6	1
v_9	1	4
v_{10}	1	2
v_{11}	1	0
v_{12}	0	5
v_{13}	3	0
v_{14}	3	0
v_{15}	6	1
v_{16}	1	1
v_{17}	1	0
v_{18}	0	2
	<u>31</u>	<u>31</u>

Del balance o de la gráfica (figura 4.21) podemos considerar nuestros vértices fuente y sumidero. Los vértices fuente - o los elementos con que contamos son los siguientes:

- V₁₃** Experiencia de proceso en México; (la experiencia influye sobre todo el sistema, nótese que esta característica también resultó fuente en el proceso de lagunas de estabilización y de lodos activados).
- V₁₄** Carga volumétrica (este es un dato que se debe de tener - antes de aplicar el proceso de tratamiento, también fue considerado fuente en el proceso de lodos activados).
- V₅** Tecnología (lo cual indica la consideración de los requerimientos tecnológicos necesarios para obtener la eficiencia deseada. También fue considerado fuente en el proceso de lodos activados).
- V₁₇** Infraestructura requerida (este elemento debe considerarse con cierta precaución, puesto que a diferencia de los demás, sólo afecta a una sola característica, que es la - adaptabilidad).
- V₁₁** Molestias producidas en el ambiente. Esta característica aparece en la gráfica como si fuera un vértice fuente, pero en realidad no lo es, ya que no tiene ninguna relación indispensable. En la figura solo aparece una relación - fuerte que influye sobre el vértice V₉ adaptabilidad, sin embargo a este vértice deben entrar varias "flechas" que no estan dibujadas por la aplicación de la propiedad de - transitividad.

Para evaluar el proceso, se deben considerar los v ertices sumidero (en los que haya relaciones indispensables), que para el caso de filtros percoladores son:

- V_1 Costos de construcci3n (representa una caracterfstica determinante en la evaluaci3n del proceso, considerando - tambi3n en los procesos de tratamiento de lagunas de esta bilizaci3n y lodos activados).
- V_2 Costos de operaci3n y mantenimiento (igual que V_1).
- V_{12} Eficiencia (medida como % de DBO removida, l3gicamente - constituye un elemento de evaluaci3n esencial).
- V_{18} Problemas que se presentan comunmente (constituye un elemento de evaluaci3n que debe considerarse con cierta precauci3n).

Las relaciones constituyentes de este proceso son:

~~(1,4)~~, ~~(1,8)~~, ~~(1,9)~~, (1,15), ~~(1,16)~~, ~~(2,5)~~, (2,6), ~~(2,8)~~, ~~(2,10)~~,
 (2,15), ~~(3,12)~~, (3,14), (3,16), (4,15), ~~(5,6)~~, ~~(5,10)~~, (5,12),
~~(6,8)~~, (7,8), (8,12), ~~(8,13)~~, ~~(8,18)~~, (9,11), ~~(9,14)~~, (9,15),
 (9,17), (10,15), (12,13), (12,15), (13,18), (14,15).

Donde las relaciones cruzadas con una línea fueron sustraídas para formar el árbol de expansi3n que aparece en la siguiente figura:

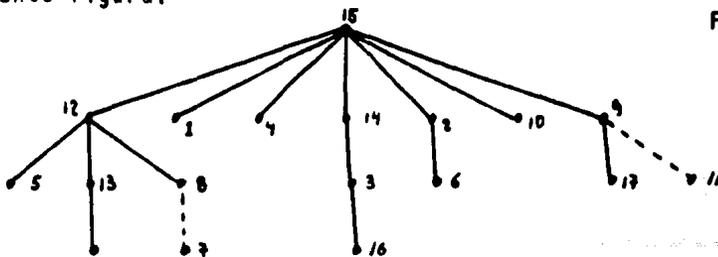


FIGURA 4.22

El rango de nuestro árbol de expansión estará definido por:

$$r = n - k$$

Donde $n = \text{No. de vértices} = 18$ y $k=1$ (gráfica de un componente),

$$r = 18 - 1 = 17 \text{ ramas}$$

La nulidad del árbol o número de cuerdas o número de aristas eliminadas:

$$A = e - n + k$$

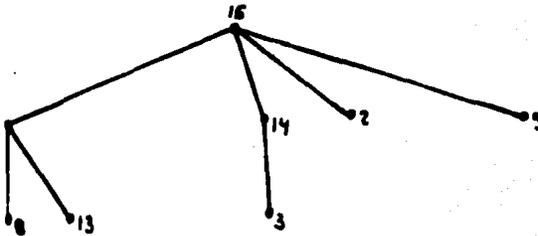
$$A = 31 - 18 + 1 = 14$$

Lógicamente $e = r + A = 14 + 17 = 31$ aristas, que son el número de enlaces de la figura 4.20 y 4.21.

A partir del árbol de expansión, obtendremos nuestro vértice centro (eliminando sucesivamente los vértices suspensos):

FIGURA 4.23

1a. eliminación



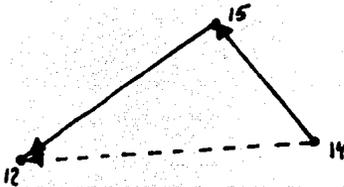
2a eliminación



Por lo tanto tenemos un centro con una excentricidad de 3 (puesto que la 3a eliminación dejaría solo al vértice 15); por lo que nuestro vértice centro es V_{15} (procesos antecedentes) - el cual constituye una característica importantísima en todo - el proceso, puesto que mantiene una relación indispensable con 7 características, además de 6 relaciones fuertes con otras 6 características.

En este proceso de tratamiento, se pueden desarrollar análisis sobre áreas de síntesis o circuitos fundamentales como - en los dos procesos de tratamiento anteriores, dependiendo del interés que se tenga sobre cada característica en especial. Así que, orientando las relaciones que se tienen 4.24 y analizándola tenemos:

FIGURA 4.25



La figura 4.25 marca claramente la influencia que V_{15} (procesos antecedentes) tiene sobre V_{12} (eficiencia), lo cual es perfectamente lógico, puesto que si se sustraen las rejillas, sedimentadores, etc. La eficiencia del proceso disminuiría sustancialmente. Por otro lado la figura muestra la influencia de V_{14} (carga volumétrica) sobre V_{15} , lo cual también resulta lógico, puesto que si el material de desecho o descarga o carga volumétrica a tratar, tienen por ejemplo, gran cantidad de gruesos, será necesario colocar equipo de pretratamiento como las rejillas y desarenadores. Luego entonces, la carga volumétrica influye sobre la eficiencia del proceso (relación inferida V_{14} , V_{12}). El área de síntesis, que envuelven los vértices V_{14} , V_{15} y V_{12} nos indica que la eficiencia no solo aumenta perfeccionando a los filtros percoladores, o enfocándonos a aumentar la velocidad de degradación del material orgánico. Sino que también, esta eficiencia puede aumentarse en el pretratamiento del desecho, mediante procesos físicos que en ocasiones resultan mucho más baratos y funcionales (lo cual se puede saber, analizando un circuito fundamental que formen V_{15} y los vértices de costos de construcción, operación y mantenimiento).

Finalmente las características fundamentales obtenidas del análisis son:

- a) Vértices fuente; Características V_{13} , V_{14} , V_5 y V_{17} .
- b) Vértices sumidero; Características V_1 , V_2 y V_{18} .
- c) Vértices centro; Característica V_{15} .

4.3.4 MODELO GRAFICO PARA EL PROCESO DE TRATAMIENTO "BIODISCOS".

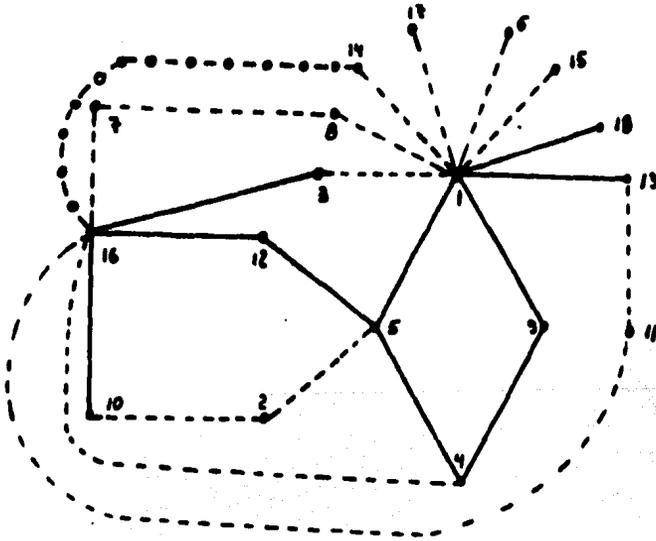
La matriz está desarrollada, de la misma manera que en los tres procesos anteriores de la tabla 4.1, pero ahora consideran do la columna correspondiente al proceso "biodiscos".

	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
V 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
V 2	1	2	1	3	2	0	2	3	1	0	2	3	2	2	2	2	3	
V 3		1	1	2	1	0	2	1	2	0	0	1	2	2	2	1	0	
V 4			2	2	1	0	2	2	2	1	2	1	2	2	3	2	1	
V 5				3	1	0	1	3	1	1	1	1	2	2	2	1	1	
V 6					1	0	2	2	2	0	3	1	2	1	2	1	1	
V 7						0	2	2	1	1	1	0	1	2	2	1	0	
V 8							2	0	0	0	0	0	2	0	2	0	0	
V 9								2	2	1	2	2	2	1	2	1	1	
V 10									1	1	1	2	2	2	2	2	1	
V 11										0	2	1	2	1	3	1	0	
V 12											0	2	2	1	2	1	1	
V 13												1	2	1	3	2	1	
V 14													1	1	2	1	0	
V 15														1	2	1	0	
V 16															1	1	0	
V 17																2	1	
V 18																		2

Nótese que en esta matriz, hay tan solo diez relaciones indispensables (relaciones con un valor asignado de "3"), lo cual se debe principalmente a la información limitada que del proceso se tiene.

Para construir el modelo gráfico correspondiente, se aplican las mismas condiciones, que en los tres procesos de tratamiento anteriores (una relación indispensable está relacionada con una línea continua, una relación fuerte con una discontinua), el modelo es el siguiente:

FIGURA 4.27



Cabe recordar que las líneas representadas de esta forma (-o-o-o-), representan relaciones que ya están inferidas en otras relaciones, pero que se ponen para servir como "puente" entre otras relaciones, para evitar que estas se crucen y rompan la planaridad.

Entre las características de esta gráfica tenemos lo siguiente:

$$\begin{array}{cccc}
 g(V_1) = 10 & g(V_6) = 1 & g(V_{11}) = 2 & g(V_{16}) = 7 \\
 g(V_2) = 2 & g(V_7) = 2 & g(V_{12}) = 2 & g(V_{17}) = 1 \\
 g(V_3) = 2 & g(V_8) = 2 & g(V_{13}) = 2 & g(V_{18}) = 1 \\
 g(V_4) = 3 & g(V_9) = 2 & g(V_{14}) = 2 & \\
 g(V_5) = 4 & g(V_{10}) = 2 & g(V_{15}) = 1 &
 \end{array}$$

$$g(V_i) \ 10+2+2+3+4+1+2+2+2+2+2+2+2+1+7+1+1 = 48$$

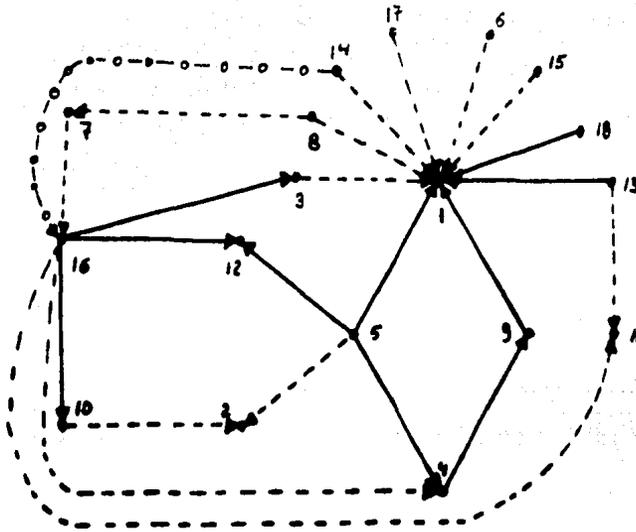
Puesto que:

$$\sum g(v_i) = 2e \quad e = 48/2 = 24 \text{ aristas.}$$

- Hay 24 aristas, que representan 10 relaciones indispensables y 14 relaciones fuertes.
- La gráfica es conexa (de un solo componente)
- La gráfica es plana
- La gráfica puede adquirir otra forma, pero sus características conceptuales seguirán siendo las mismas.

Representando la gráfica en forma orientada, tenemos la siguiente figura:

FIGURA 4,28



La formación de la gráfica dirigida se realizó de la misma forma que los procesos de tratamiento anteriores, donde la "cola de la flecha" representa la característica, que influye sobre la característica que señala la "punta de la flecha".

El balance de los grados de los vértices del modelo gráfico de la figura 4.28 es el siguiente:

TABLA 4.5

(v_i)	$g^-(v_i)$ salen	$g^-(v_i)$ entran
v_1	0	10
v_2	0	2
v_3	1	1
v_4	1	2
v_5	4	0
v_6	1	0
v_7	1	1
v_8	2	0
v_9	1	1
v_{10}	1	1
v_{11}	0	2
v_{12}	0	2
v_{13}	2	0
v_{14}	2	0
v_{15}	1	0
v_{16}	5	2
v_{17}	1	0
v_{18}	<u>1</u>	<u>0</u>
	24	24

Con la figura 4.28 o con la tabla 4.5, establecemos nuestros vértices fuente y sumidero.

Las características fuente son:

- v_5 Tecnología (considerada también en el proceso de los dos activados y filtros percoladores).

V₈ Aplicación industrial (considerado también en todos activados y lagunas de estabilización).

V₁₃ Experiencia del proceso en México (aunque en México no existe ningún tipo de experiencia, la característica influye sobre lo demás).

V₆, V₁₄, V₁₅, V₁₇ y V₁₈. No forman ninguna relación indispensable, por lo que no son considerados en las características fuente.

Las características sumidero son:

V₁ Costos de construcción (nótese la gran cantidad de relaciones que influyen sobre esta característica, que actualmente constituye el principal elemento de evaluación de este proceso de tratamiento).

V₂ Costos de operación y mantenimiento (nótese que no hay relaciones indispensables en este vértice).

V₁₂ Eficiencia (esta característica de evaluación, también fue considerada en los otros procesos de tratamiento).

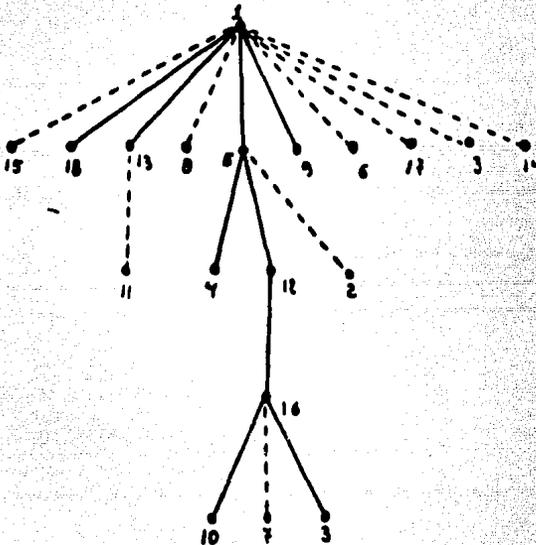
V₁₁ Molestias producidas (igual que V₂).

Este proceso de tratamiento, puede verse, que solo hay 10 relaciones indispensable, lo cual no significa que hay poca influencia entre sus características componentes, sino mas bien, refleja la incertidumbre que en general se tiene sobre el proce

so, puesto que en general (sobre todo en los países no europeos, excepción E.U.) se carece de experiencia y de información sobre el sistema biodisco.

Eliminando las relaciones (2,10), (4,9), (4,16), (11,16), (3,16), (4,16) establecemos nuestro árbol de expansión.

FIGURA 4.29



Entre las características de este árbol de expansión, tenemos lo siguiente:

- Está constituido por 18 vértices ($n=18$) y de un solo componente ($k=1$)

$$r = n - k$$

$$r = 18 - 1 = 17 \text{ ramas}$$

- El número de aristas eliminadas o cuerdas, están definidos por la nulidad (μ):

$$\mu = e - n + k \quad \text{Donde } e = 24 \text{ aristas}$$

$$\mu = 24 - 18 + 1 = 7$$

Por lo que del modelo gráfico establecido para el proceso de tratamiento de biodiscos se eliminaron 7 relaciones.

Eliminando los vértices suspensos para obtener el vértice centro tenemos lo siguiente:

FIGURA 4.30

1a. eliminación

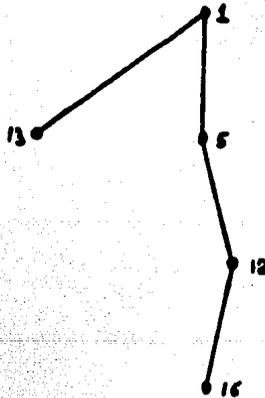


FIGURA 4.31

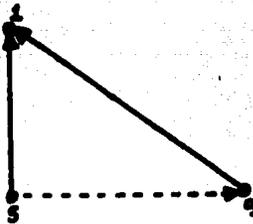
2a. eliminación



Puesto que la tercera eliminación dejaría sólo al vértice 5, tenemos que el centro es V_5 (tecnología), el cual tiene la menor distancia que un vértice presenta con respecto al vértice más alejado; en este proceso, la tecnología constituirá la característica central de equilibrio, lo cual resulta lógico, puesto que el proceso está caracterizado y diferenciado de los demás procesos por su innovación tecnológica.

En base a esta innovación tecnológica, analizamos el área de síntesis formada por los vértices V_5 (tecnología), V_9 (adaptabilidad) y V_1 (costos de construcción) cuya relación está representada por la digráfica de la siguiente figura:

FIGURA 4.32



Al analizar el circuito fundamental de la figura 4.32 encontramos en primer instancia la relación inferida entre V_5 y V_9 que establece la influencia que tiene la tecnología sobre la adaptabilidad del proceso biodisco, ambas características, influyen directamente sobre los costos de construcción, sin embargo ambas relaciones (V_9, V_1) y (V_5, V_1) dependen directamente de la tecnología, esto es, la relación (V_9, V_1) esta condi-

cionada por V_5 (tecnología), lo cual era de esperarse, puesto - que V_5 es el vértice central del árbol de expansión de la figura (4.29).

Del análisis anterior, se puede establecer que las características fundamentales de este proceso son:

- a) Vértices fuente; V_5, V_8 y V_{13}
- b) Vértices sumidero; V_1, V_2 y V_{12}
- c) Vértice centro; V_5 .

4.4 CRITERIOS DE SELECCION

En las selecciones anteriores, se encontró en el desarrollo de los modelos gráficos, que las características más importantes a considerar son aquellas que constituyen un vértice fuente, sumidero o central: puesto que, estos constituyen los conceptos de apoyo, las características de evaluación y el tema central de equilibrio del proceso respectivamente.

Las características que aparecen en la tabla (4.1), - definen los parámetros comparativos de los diferentes procesos de tratamiento, por lo que representan nuestros criterios de selección.

Como ya se describió, las características fuente, sumidero y centro, representan los criterios con mucho mayor peso que los demás y que por tanto, deben tomarse en cuenta con mucho mayor detalle.

La tabla de la siguiente hoja (4.6), presenta estos criterios de mayor peso y su condición de fuente, sumidero o centro.

TABLA 4.6

CRITERIO	V _i	LAGUNAS DE ESTAR.	LODOS ACTIVADOS	FILTROS	BIODISCOS
Costos de construc.	V ₁	SUMIDERO	SUMIDERO	SUMIDERO	SUMIDERO
Costos de op. y mant.	V ₂	SUMIDERO	SUMIDERO	SUMIDERO	SUMIDERO
Tecnología	V ₅	CENTRO	FUENTE CENTRO	FUENTE	FUENTE CENTRO
Aplicación industrial	V ₈	FUENTE	FUENTE	---	FUENTE
Adaptabilidad	V ₉	CENTRO	SUMIDERO	--	---
Requerimientos de energía.	V ₁₀	SUMIDERO	SUMIDERO	---	---
Eficiencia	V ₁₂	SUMIDERO	SUMIDERO	SUMIDERO	SUMIDERO
Experiencia en México	V ₁₃	FUENTE	FUENTE	FUENTE	FUENTE
Carga volumétrica	V ₁₄	---	FUENTE	FUENTE	---
Procesos antecedentes	V ₁₅	---	FUENTE	CENTRO	---
Otros parámetros a controlar	V ₁₆	FUENTE	---	--	---
Infraestructura requerida	V ₁₇	---	---	FUENTE	---

De la observación de la tabla, puede definirse la posición de cada criterio respecto a los procesos de tratamiento;

se puede notar que ninguna característica es fuente en un proceso y sumidero en otro; de esta forma, puede considerarse que los criterios de evaluación para el tratamiento de materiales orgánicos está definido principalmente por:

- Costos de construcción
- Costos de operación y mantenimiento
- Eficiencia del proceso

Y en un menor grado por:

- Adaptabilidad
- Requerimientos de energía

Que la evaluación de los procesos de tratamiento de materiales orgánicos, estará apoyada por los conceptos base o - fuente que determinan el desarrollo del proceso de tratamiento:

- Aplicación industrial
- Tecnología
- Experiencia del proceso
- Carga volumétrica

Y en un menor grado por:

- Procesos antecedentes (rejillas, desarenadores, sedimentadores, etc.)
- Control de otros parámetros
- Infraestructura requerida

Y finalmente, los criterios con mayor interrelación - en los procesos de tratamiento (esto es, que influyen sobre los demás y viceversa) para los procesos de tratamiento orgánico son:

- Tecnología
- Adaptabilidad
- Procesos antecedentes

4.5 APLICACION DE LOS MODELOS EN ALGUNAS INDUSTRIAS

Los procesos de tratamiento desarrollados anteriormente son empleados específicamente para desechos con gran contenido de material orgánico, por lo que son de mucha aplicación en una gran variedad de industrias.

Para la selección de un proceso en una industria determinada, es necesario conocer el origen y las características de los vertidos.

Para algunas industrias de alimentos, materiales y bienes de consumo principalmente, se tiene la siguiente tabla (4.7) con información del origen y la contaminación común de una determinada industria:

TABLA 4.7

INDUSTRIA	ORIGEN	CONTAMINACION COMUN
Alimentos enlatados	Extracción de jugo o tratamiento	Sólidos en suspensión, materia orgánica disuelta y coloidal
Productos de leche	Dilución de leche, mantequilla y suero	Gran cantidad de materia orgánica disuelta (proteínas, grasas)
Bebidas (destiladas y fermentadas)	Tratamiento de grano y residuo de la destilación del alcohol	Gran contenido de sólidos orgánicos, con almidones fermentados o subproductos

INDUSTRIA	ORIGEN	CONTAMINACION COMUN
Gomas	Lavado de látex, goma coagulada	Gran contenido de sólidos en suspensión, DBO alto, grandes olores y contenido en cloruros
Papel	Cocción, refinado lavado de fibras, tamizado de pulpa de papel	Gran contenido de sólidos en suspensión, coloidales y disueltos
Textiles	Eliminación del - apresto en el material base	Sólidos en suspensión - altos, materiales coloreados, etc.
Curtiduría	Pelado, remojado, lavado de pieles	Sólidos totales altos - DBO alto, dureza, sales y otros contaminantes

La aplicación de los modelos gráficos, necesitará la alimentación de los datos requeridos a los vértices fuente, sumidero central; así por ejemplo, el tratamiento empleado comúnmente en las industrias alimenticias de productos de leche son los filtros percoladores y los lodos activados (2); sin embargo esto no basta para seleccionar uno de estos procesos en el tratamiento de los desechos orgánicos, puesto que generalmente las condiciones son muy diferentes en cada industria lechera, no solo internamente, sino en relación también, al sistema al que pertenece la industria.

Si se desea conocer la relación de alguna característica en especial con otra u otras, es necesario desarrollar el área de síntesis requerida para analizar esta característica y asignarle el peso adecuado.

Para la selección de un proceso adecuado, mediante la -- utilización de modelos, es necesario conocer perfectamente -- los datos fuente, tales como la carga volumétrica y la experiencia analizar detalladamente los circuitos fundamentales y establecer las bases de diseño del proceso, tales como el porcentaje de remoción de la DBO, la infraestructura requerida, etc., lo cual constituye material suficiente para justificar el desarrollo de otro trabajo.

5.- CONCLUSIONES

- En los procesos de tratamiento de aguas residuales, no siempre se requiere la misma calidad de agua, sino que esta calidad, depende de la aplicación, de los usos ó de la fauna -- y/o flora que habiten en el lugar. Estableciéndose en base a esto, los requerimientos de calidad de agua, exigidos por el estado.
- Para la selección de un proceso de tratamiento, debe contarse con una certidumbre total, de la representatividad que - del desecho ofrece la muestra; determinándose de esta etapa, principalmente el caudal, la temperatura, la DBO y el - oxígeno disuelto.
- En los costos de producción de algunos bienes o servicios - desarrollados en el país, no se han considerado los costos por concepto de desgaste ambiental; costos que entonces, - son cubiertos por la sociedad en su conjunto.
- Existen en México 3 reglamentos, que "protegen" los recur-- sos acuíferos del país:
 - 1.- Ley federal de aguas
 - 2.- Ley federal para prevenir y controlar la contamina-- ción ambiental.
 - 3.- Reglamento para la prevención y control de la conta-- minación de aguas.

Reglamentos que en términos generales, no se respetan.

- Una planta de Proceso de tratamiento de aguas residuales, - sustituye las diferentes etapas, de autopurificación de un

río, por una serie de uno o más procesos unitarios, pero -- desarrollados en un menor tiempo y en un menor espacio, (tra-- tándose de materiales biodegradables como los desechos orgá-- nicos).

- Por su etapa de tratamiento, los procesos de tratamiento es-- tán divididos en 4 partes:

- 1.- Pretratamiento (sirve como acondicionamiento para - tratamientos posteriores).
- 2.- Tratamiento primario (basado esencialmente en proce-- sos físicos).
- 3.- Tratamiento secundario (la depuración es efectuada - generalmente por procesos biológicos).
- 4.- Tratamiento terciario (procesos físicoquímicos o qui-- micos, que representan en términos generales los pro-- cesos más avanzados).

- Los procesos de tratamiento biológico, se caracterizan por ser procesos de degradación de la materia orgánica, a dife-- rencia de otros procesos que sustraen el contaminante de -- las aguas residuales, pero que en resumidas cuentas, preva-- lece el problema de su disposición final.

Estos procesos tienen como base la creación de un medio am-- biente adecuado para el desarrollo de un sistema ecológico, capaz de considerar a los desechos como substrato de los mi-- croorganismos.

- El proceso de lagunas de estabilización, está caracterizado por sus bajos costos de construcción, operación y manteni-- miento; y definidos por parámetros físicos (temperatura, - insolación, lluvia, vientos, evaporación, etc.), químicos - (nutrientes, oxígeno disuelto, pH, etc.) y biológicos. Re-

presenta el proceso de tratamiento más usual en el país, - con eficiencias de remoción de la DBO hasta del 90%.

- El proceso de lodos activados, es costoso en su construc--ción, operación y mantenimiento. Aquí la acción microbiana es fundamental. La degradación está definida por 2 etapas, una de síntesis (que representa el crecimiento de microorga--nismos) y la otra de respiración endógena (donde la veloci--dad de destrucción del microorganismo excede a la de síntesis); el lodo formado está caracterizado por su velocidad - de sedimentación zonal, por la fracción de alimentos (F/M) y por su índice volumétrico.
- El proceso de filtros percoladores, presenta costos de cons--trucción, operación y mantenimiento elevados; los paráme--tros a considerar en su diseño son las rocas y la profundi--dad. En México se cuenta con la experiencia suficiente, pa--ra el desarrollo de estos procesos.
- El proceso biodiscos, resulta costoso en su construcción, - operación y mantenimiento, pero con la ventaja de un menor requerimiento en energía, con respecto a los procesos de --filtros y lodos activados; además de las variables comunes, influyen sobre este la velocidad de rotación del disco y el diámetro de este.
En México, no existe ninguna experiencia sobre este proceso.
- A la fecha, las plantas de tratamiento que operan en México, son ineficientes e insuficientes (dato hasta 1984).
- Un proceso de tratamiento en función de sus características, puede ser representado mediante un modelo gráfico, que esta--blece la estructura de un concepto ó fenómeno con una mayor claridad.

- Para la construcción de un modelo gráfico, se requiere del establecimiento de relaciones entre diferentes características, asignándole valores a estas relaciones y representándolas por medio de una matriz.
- Debe evitarse el cruce de líneas (relaciones) en la formación de una gráfica; o sea, debe mantenerse la planaridad, para un mejor análisis de conceptos.
- En un modelo gráfico, al establecerse un balance de vértices, la diferencia:

$$g^+ (V_i) - g^- (V_i) = 0$$

Puesto que el número de relaciones que "entran" es igual al número de relaciones que "salen", y siempre que hay un punto inicial, hay uno final.

- Tres o más relaciones, tienen un significado especial dentro del contexto general de la gráfica, formando un área de sin tesis ó circuito fundamental, que constituye un nuevo concepto surgido de las características que los forman.
- En el desarrollo de modelos, es importante dirigir la gráfica (formar una digráfica) para establecer como es la relación.
- De la formación de modelos, pueden establecerse los conceptos sobre los cuales se apoyan ó emanan los demás, definidos como vértices fuente y que representan, las características que minimamente deben conocerse, para el desarrollo del proceso de tratamiento.
- Las características de evaluación en los procesos de tratamiento, pueden definirse mediante los modelos representados

por los vértices sumidero de la gráfica.

- Un modelo gráfico está constituido por una ó varias subgráficas, que representan la estructura básica del proceso, de nominadas 'árbol de expansión'.
- El tema central de equilibrio (que representa las vías de enlace más concurridas) está caracterizado por el vértice central.
- Del análisis de los modelos gráficos para los diferentes -- procesos de tratamiento, se tiene que; los criterios necesarios para el desarrollo de una toma de decisiones en la - selección de un determinado proceso, estarán basados en un menor grado en las características fuente, por considerar - que representan el contenido que se tiene del proceso:

a) Experiencia que se tiene del proceso

b) Carga volumétrica

En un grado medio, por las características centro, por considerar que representan la metodología a seguir en el proceso:

a) Tecnología

b) Adaptabilidad

Y en un mayor grado, por las características sumidero (teniendo un mayor peso que las características fuente y centro); por considerar que representan los criterios de evaluación del proceso:

a) Costos de construcción

b) Costos de operación

c) Eficiencia del proceso

B I B L I O G R A F I A

1. AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES
Nelson L. Nemerow
Ed. Blume Madrid, 1982
2. THE TREATMENT OF INDUSTRIAL WASTES
E.B. Besselièvre and M. Schwartz
Ed. Mc. Graw Hill México, 1976
3. MANUAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS NEGRAS
Depto. de Sanidad del Estado de Nueva York
Ed. Limusa N.Y., 1970
4. TRATAMIENTO DE AGUAS NEGRAS Y DESECHOS INDUSTRIALES
Barnes, George E.
Ed. Uthea México, 1966
5. ADVANCED WASTEWATER TREATMENT
Culp Rusell, L.
Ed. Van Nostran Renhold N.Y., 1971
6. GRAPH THEORY APLICACIONES TO ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE
Narsingh, Deo
Ed. Prentice-Hall Englewood, Cal., 1974
7. GRAPH THEORY
Harary F.
Ed. Addison-wesley N.Y., 1969

8. ENFOQUE DE SISTEMAS EN LA EDUCACION (TEORIA DE GRAFICAS)
Salazar Resines J.
Ed. Limusa México, 1979
9. TRATAMIENTO DE AGUA PARA LA INDUSTRIA Y OTROS USOS
Eskkel Nordel
Ed. CECSA México, 1979
10. TRATAMIENTO DE AGUA DE PROCESOS Y DESECHOS INDUSTRIALES
American Society For Testing and Materials
Ed. Limusa, 3a. Edic. México, 1976
11. INTRODUCTION TO WASTE WATER TREATMENT PROCESS
R.S. Ramalho
Laval University, Academic Press Québec, 1977
12. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, INDUSTRIALES Y DE REUSO
(CURSO)
DECFI
Ed. UNAM México, 1984
13. TRATAMIENTO DE EFLUENTES (CURSO)
Instituto Mexicano del Petróleo
IMP México, 1984.
14. ENCICLOPEDIA DE TECNOLOGIA QUIMICA
Raymond e Kirk y Donald F. Othmer
Ed. UTEHA Madrid, 1966
15. MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO
Perry R.H./C.H. Chilton
Ed. Mc Graw Hill, 5a. Edic. España, 1982

16. DESIGN METHODOLOGY FOR FIXED-FILM REACTORS RBC'S AND BIOLOGICAL TOWERS
Kinkannon, D.F. and E. Stover
Inc. Civil Engineering For Practicing and Design Engineers
Vol II Pergamons Press N.Y., 1983
17. BIOLOGICAL PROCESS DESIGN FOR WASTEWATER TREATMENT
Benefield, Larry D.
Ed. Prentice-Hall Englewood, Cal., 1980
18. LAGUNAS DE ESTABILIZACION DE AGUAS NEGRAS
F. Montejano, E. Murguía y G. Mendoza
Ed. UNAM México, Agosto de 1969
19. NECESIDADES DE INVESTIGACION EN MEXICO SOBRE LA RENOVACION Y REUSO DE LAS AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES.
Cuéllar Ch. Raúl
Simposio Internacional Sobre Renovación de Aguas Residua -
les para Reuso en Sistemas Agrícola e Industriales, NSF.
CONACYT, Cocoyoc México, 1980
20. TEORIA DE GRAFICAS.
Santiago López de Medrano
Ed. ANUIES México, 1983
21. INTRODUCCION A LA TEORIA DE GRAFICAS EN EL CAMPO DE LA EDUCACION
Donna Jackson y González Martínez M.D.
Ed. ANUIES México, 1979
22. WATER QUALITY ENGINEERING FOR PRACTICING ENGINEERS
Eckenfelder W. Jr.
Ed. Barnes and Noble N.Y., 1970

23. ALTERNATIVAS DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
Cuéllar, Ch. Raúl
Simposio Sobre Contaminación Ambiental
CONACYT Mérida, Yucatan, 1981
24. LEY FEDERAL DE AGUAS
Secretaría de Recursos Hidráulicos
SRH México, 1972
25. LEGISLACION SOBRE LA CONTAMINACION AMBIENTAL
Andrade Manuel
Ed. Andrade México, 1972
26. OPTIMIZE THE EFFLUENT SYSTEM. HYDROCARBON PROCESSING
J. F. Grutsch and R.C. Mallat
Part. 1. March 1976 pág. 105-112
Part. 2. April 1976 pág. 213-218
Part. 3. May 1976 pág. 221-230
Part. 4. June 1976 pág. 115-123
Part. 5. July 1976 pág. 113-118
Part. 6. August 1976 pág. 137-142
Hydrocarbon Processing
27. ENERGY FOR WASTEWATER TREATMENT
B.V. Prather and E. P. Young
Hydrocarbon Processing, Mayo 1976 pp. 88-91
28. ENERGY CONSERVATION AND ALTERNATIVE ENERGY SOURCES IN
WASTEWATER TREATMENT
Roshbrook, E. L. and D. A. Wilke
Ed. Journal of The Water Pollution Control Federation, 1980

29. ROTATING DISCS FULFILL DUAL WASTEWATER ROLE
Antonie, R. and K. Van Aacken
Ed. Water and Waste Engineering, 8 (11), 37-38, 1971
30. FIXED-FILM BIOLOGICAL PROCESSES
Josephson, J.
Environmental Science and Technology 16 (7) QN-394A, 1982
31. BIO-DISC "PRELIMINARY RESULTS OF A NOVEL BIOLOGICAL PROCESS FOR TREATING DAIRY WASTES" IN PROCEEDINGS OF 24TH INDUSTRIAL WASTE CONFERENCE.
Antonie, R.L. and F.M. Welch
Purdue University, 1969
32. RESUMEN PARA LA PRESENTACION DEL DISTRITO REGIONAL DEL CONTROL DE LA CONTAMINACION DEL AGUA DEL ESTUARIO DEL RIO COATZACOALCOS.
Secretaría de Recursos Hidráulicos México, 1978
33. CONFERENCIA INTERGUBERNAMENTAL PARA EL CONVENIO SOBRE VERTIMIENTO DE DESECHOS EN EL MAR.
Informe Técnico 110
SARH México, 1966
34. "POLUCION" CONTAMINACION INDUSTRIAL, AGRICOLA Y DOMESTICA DE LAS AGUAS.
Depto. de Planeación, Investigación y Estadísticas
Memorandum Técnico No. 10
SARH México, 1957
35. LEY FEDERAL PARA PREVENIR Y CONTROLAR LA CONTAMINACION AMBIENTAL.
Secretaría de Recursos Hidráulicos
SRH México, 1970

36. REGLAMENTO PARA LA PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN
DE AGUAS.

Secretaría de Recursos Hidráulicos

SRH México, 1970.