

10524  
49



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES DE CUAUTITLAN

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN**

Departamento de  
Trabajos Profesionales

**DETERMINACION DE PARAMETROS PARA EL DISEÑO  
DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS  
RESIDUALES DEL INTERCEPTOR PONIENTE POR  
MEDIO DEL METODO DE LODOS ACTIVOS**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**QUIMICA FARMACEUTICA BIOLOGA**

**P R E S E N T A :**

**CLAUDIA PEREZ GARRIDO**

ASESOR DE TESIS:

I.O. MARGARITA ALONSO ESPINOZA

1  
CUAUTITLAN IZCALLI, EDO DE MEXICO

2002



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

Determinación de Parámetros para el Diseño de una Planta  
de Tratamiento de Aguas Residuales del Interceptor Poniente  
por medio del Método de Lodos Activados.

que presenta la pasante: Claudia Pérez Garrido  
con número de cuenta: 8754181-2 para obtener el título de :  
Química Farmacéutica Bióloga

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 19 de Marzo de 1 2002

PRESIDENTE Q.F.B. Marina L. Morales Galicia

VOCAL I.Q. Margarita Alonso Espinoza

SECRETARIO I.A. Natividad Venegas Herrera

PRIMER SUPLENTE Q.F.B. Leticia Badillo Solís

SEGUNDO SUPLENTE Q. Ofelia Vega Vázquez

9

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Con especial cariño a mis Padres que con Amor y Fé siempre han deseado lo mejor para sus hijos.

Con agradecimiento a mis Hermanos por la Confianza depositada en mí.

A mi esposo José por apoyarme en todo momento en el logro de mis objetivos.

A mi asesor de Tesis I.Q. Margarita Alonso que al igual que las profesoras: Q.F.B Marina L. Morales, I.A. Natividad Venegas y Q.F.B Leticia Badillo por brindarme su apoyo y tiempo para la realización de este trabajo.

A mi Hijo Benjamin.

## ABREVIATURAS

<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno</b>	<b>DBO</b>
<b>Demanda Química de Oxígeno</b>	<b>DQO</b>
<b>Índice Volumétrico de Sedimentación</b>	<b>SVI</b>
<b>Interceptor Poniente de la Ciudad de México</b>	<b>IPCM</b>
<b>Oxígeno Disuelto</b>	<b>OD</b>
<b>Reactor de Flujo Continuo en Tanque Agitado</b>	<b>RFTCA</b>
<b>Sólidos Suspendidos</b>	<b>SS</b>
<b>Sólidos Suspendidos del Licor Mezclado</b>	<b>SSLM</b>
<b>Sólidos Suspendidos No Volátiles del Licor Mezclado</b>	<b>SSNVLM</b>
<b>Sólidos Suspendidos Totales</b>	<b>SST</b>
<b>Sólidos Suspendidos Totales del Licor Mezclado</b>	<b>SSTLM</b>
<b>Sólidos Suspendidos Volátiles</b>	<b>SSV</b>
<b>Sólidos Suspendidos Volátiles del Licor Mezclado</b>	<b>SSVLM</b>
<b>Sustrato</b>	<b>S</b>
<b>Tiempo de Retención Hidráulico</b>	<b>T<sub>h</sub></b>
<b>Tiempo Medio de Retención Celular</b>	<b>TMRC</b>

## **INDICE**

**INDICE DE ESQUEMAS, TABLAS Y GRÁFICAS**

**INTRODUCCION**

**ANTECEDENTES**

**RESUMEN**

**OBJETIVOS**

### **I. MARCO TEORICO**

#### **1.1 Tratamiento de Aguas Residuales**

1.1.1 Definición

1.1.2 Contaminantes más Importantes en el tratamiento del Agua Residual

1.1.3 Niveles de Tratamiento de Aguas Residuales

1.1.4 Tratamiento Secundario

#### **1.2 Proceso de Lodos Activados**

1.2.1 Orígenes y Fundamentos del Sistema

1.2.2 Mecanismos del Proceso de Lodos Activados

#### **1.3 Sistema de Tratamiento Biológico**

1.3.1 Objetivo del Proceso Biológico

1.3.2 Mecanismos del Tratamiento Biológico

1.3.3 Condiciones para la Biodegradación

1.3.4 Factores que afectan el Tratamiento Biológico

**1.4 Modelo Básico del proceso Convencional de lodos Activados**

**1.4.1 Parámetros de Operación y Control**

**1.4.2 Relaciones Cinéticas**

**1.4.3 Parámetros Biocinéticos en Reactores Biológicos Aerobios**

**2. MATERIALES Y METODOS**

**2.1 Reactores Continuos a Escala de Laboratorio**

**2.2 Acondicionamiento de Lodo Activado**

**2.3 Programa de Muestreo**

**3. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

**Condiciones de Arranque**

**4. RESULTADOS**

**4.1 Obtención y Procesamiento de Datos Experimentales**

**4.2 Análisis de Resultados**

**5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

**6. ANEXOS**

**7. BIBLIOGRAFIA**

## INDICE DE ESQUEMAS, TABLAS Y GRÁFICAS

ESQUEMA 1. Proceso de lodos Activados.

ESQUEMA 2. Evolución de los microorganismos (SSVLM) y Concentración del sustrato en función del tiempo

ESQUEMA 3. Esquema del Reactor Continuo.

TABLA 1. Caracterización Físicoquímica de las Aguas Residuales del I.P.

TABLA 2. Factores Químicos que influyen en la Biodegradabilidad de Contaminantes Orgánicos.

TABLA 3. Factores Biológicos que influyen en la Biodegradabilidad de Contaminantes Orgánicos.

TABLA 4. Parámetros utilizados en la Experimentación.

TABLA 5. Condiciones iniciales de Operación

TABLA 6. Condiciones de Operación.

TABLA 7. Valores Promedio Para Cinética de Consumo de Sustrato

TABLA 8. Parámetros Biocinéticos

TABLA 9. Valores Promedio para Cinética de Producción de Biomasa.

TABLA 10. Valores Promedio para Parámetros de Control mantenidos durante la Actividad Experimental.

TABLA 11. Comparación de Parámetros Experimentales y Parámetros calculados de acuerdo a la Ecuación de Cinética de Consumo de Sustrato.

TABLA 12. Parámetros de Diseño para Procesos de Lodos Activados.

GRÁFICA No. 1. Cinética para Consumo de Sustrato.

GRÁFICA No. 2. Cinética para la Producción de Biomasa.

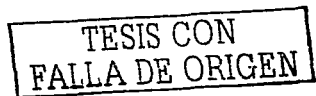


## INTRODUCCION

El abastecimiento de agua es un problema de primer orden para la Ciudad de México, entre los problemas más importantes que se presentan están el agotamiento acelerado de las capas freáticas, la ausencia de una red suficiente y eficaz de los sistemas depuradores de aguas usadas, la elección inadecuada de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, la crisis económica, una legislación casi inexistente o inoperante y la falta de concientización de los usuarios en cuanto la amplitud del problema, acompañada muchas veces de un cinismo total en el comportamiento de industriales y agricultores hacia la utilización y el reciclaje del agua.

La industrialización y el crecimiento demográfico de México generó un aumento importante de las necesidades y, por consiguiente, un incremento considerable del volumen de aguas residuales, dando lugar a un impacto ecológico negativo sobre los cuerpos receptores naturales (ríos, lagos, etc.) Debido a esta problemática, uno de los principales objetivos es la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales, tanto para descargas de tipo doméstico como de tipo industrial.

Se estimó que las aguas residuales producidas en México (1985) alcanzaron un volumen de casi 160 m<sup>3</sup>/s de esta cantidad se trató 17.5 %, pero sólo 9.5 % fue tratado con la eficacia esperada<sup>(14)</sup>. Actualmente del total de las aguas que se producen sólo se les da tratamiento a 45.9 m<sup>3</sup>/s.<sup>(9)</sup> La mayor parte de las instalaciones de tratamiento de aguas no son operativas por falta de mantenimiento, conocimiento técnico y de créditos.



La Ciudad de México cuenta con 18 plantas de tratamiento en total. La capacidad máxima de las 18 plantas que utilizan el proceso llamado de lodos activados, es de  $5.6 \text{ m}^3/\text{s}$  pero sólo se tratan  $2.8 \text{ m}^3/\text{s}$  (50 % de su capacidad),<sup>(8)</sup> debido principalmente a un mal mantenimiento de las mismas; pero este volumen tratado representa sólo una pequeña fracción del total desechado por la ciudad (aproximadamente  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ).<sup>(14)</sup> Así mismo 12 de las 42 plantas en operación del Estado de México, que utilizan el proceso de lodos activados, tienen un gasto de operación de  $2.17 \text{ m}^3/\text{s}$  (55% de su capacidad);<sup>(8)</sup> de tal modo que la mayor parte de las aguas de la ciudad y del estado es evacuada sin tratamiento y utilizada en la irrigación y el riego de las zonas agrícolas vecinas.

El presente trabajo tiene como finalidad el estudiar un sistema de reacondicionamiento de aguas residuales del Interceptor Poniente de la Ciudad de México (IPCM), basado en el uso de un modelo físico de simulación de un proceso como es el de una planta de tratamiento real. Así mismo viene a formar parte del proyecto denominado "Estudio sobre el Interceptor Poniente de la Ciudad de México" realizado en el laboratorio de Tratamiento de Aguas de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán; que pretende utilizar el agua tratada para el riego de cultivos agrícolas de la FES-Cuautitlán Campo 4, así como para otros posibles usos en la industria y áreas verdes.<sup>(5)</sup>

Los procesos de tratamiento de aguas residuales llamados "aerobios", con un predominio en las plantas que funcionan con el método de lodos activados, se consideran mezclas complejas y variables de microorganismos que proporcionan su más valiosa función en el tratamiento biológico de las aguas contaminadas.<sup>(14)</sup> En tales procesos los microorganismos se utilizan para transformar los productos residuales de la sociedad en materiales inocuos. Esto es posible porque las aguas residuales domésticas y algunos efluentes industriales son ricos en compuestos que contienen un gran número de diferentes organismos. Los procesos de tratamiento biológico de residuos son precedidos usualmente por una etapa de sedimentación, y su objetivo es la eliminación de impurezas orgánicas de las aguas residuales por conversión en masa microbiana

adicional y compuestos con cadenas de carbonos, o preferentemente dióxido de carbono.<sup>(4)</sup> Estos procesos requieren la participación de oxígeno, en la mayoría de los casos la concentración de los nutrientes se expresa en términos de la demanda de oxígeno y la concentración microbiana como el contenido de sólidos de los lodos. La validez de su uso depende de la suposición de que prevalezcan equilibrios nutritivos y ecológicos.<sup>(12)</sup> Es por tanto, deseable representar al proceso de lodos activados mediante modelos matemáticos y determinar, entonces, los parámetros aplicados en dichos modelos a partir de datos experimentales, empleando una serie de reactores de laboratorio. <sup>(22)</sup>

El proceso de lodos activados se estudia como una operación continua mediante la cinética del tratamiento biológico aerobio, para determinar la velocidad a la cual los microorganismos degradan los residuos, proporcionen ecuaciones apropiadas que describan el comportamiento del proceso y que demuestren su utilidad para propósitos de diseño.<sup>(4)</sup>

## ANTECEDENTES

El Interceptor Poniente forma parte del sistema de Drenaje Profundo para el desalojo de las aguas residuales del Distrito Federal, tiene una longitud de 47.8 Km y conduce hasta 80 m<sup>3</sup>/s. Este sistema cruza los municipios de Naucalpan, Tlalnepantla y Cuautitlán en el Estado de México; recorre el valle de Cuautitlán de Sur a Norte, en un canal a cielo abierto, en este son vertidas tanto aguas residuales de origen doméstico como industrial. A lo largo de 10 Km, desde el puente de Lechería hasta el puente que se encuentra al finalizar la zona de cultivo de la FESC-Campo 4, se localizan en la zona de influencia del Interceptor Poniente, fraccionamientos y las poblaciones de Cuautitlán Izcallí, Tultitlán, San Martín Tepetitlixpan y Cuautitlán, así como las zonas industriales de Lechería, Cuautitlán Izcallí, Parque Industrial Cuamatta y Zona Industrial Xhala.<sup>(5)</sup>

Las aguas residuales del IPCM se encuentran altamente contaminadas, y de acuerdo con la caracterización fisicoquímica<sup>(3)</sup> realizada de las mismas, se determinó que cuenta con concentraciones elevadas de carga orgánica, metales pesados, grasas y aceites, etc. Tabla: 1; donde también se observaron variaciones en los periodos de lluvias y estiaje, siendo mayores las concentraciones en éste último. Es por ello que para determinar el proceso más adecuado para el tratamiento de éstas aguas residuales, es necesario realizar pruebas de tratabilidad en un modelo físico que simule el proceso de una planta prototipo.

Parámetros	Canal Interceptor Poniente		
	Mínimo	Medio	Máximo
Temperatura °C *	19.1	20.0	21.6
pH	7.2	7.5	7.7
Color * (1)		V.A.	
Pureza * (1)			18.9
Luminosidad * (1)	11.1	15	91
Long. Onda * (1)	73	82	588
Sólidos Totales	532	560	1303
Sólidos Totales Volátiles	905	1104	509
Sólidos Suspendedos Totales	251	380	318
Sólidos Suspendedos Volátiles	58	188	178
Sólidos Sedimentables	20	99	6.2
Turbiedad UTJ *	0.1	3.2	428
Conductividad * (2)	114	271	1320
Acidez	844	1082	13
Alcalinidad	0.7	7	406
Boro	244	325	0.93
Cianuros	0.00	0.21	149
Cloruros	73	111	15.8
Detergentes	7.2	1105	0.58
Fenoles	0.06	0.32	5.7
Fosfatos	1.9	3.8	38
Nitrógeno	20	29	85
Grasas y Aceites	33	59	560
Demanda Química de Oxígeno	276	418	288
Demanda Bioquímica de Oxígeno	152	220	2.4x10 <sup>6</sup>
Coliformes Totales * (3)	2.4x10 <sup>6</sup>	2.4x10 <sup>6</sup>	2.4x10 <sup>6</sup>
Coliformes Fecales * (3)	1.1x10 <sup>6</sup>	1.75x10 <sup>6</sup>	0.91
Arsénico	0.0	0.031	0.202
Bario	0.0	0.091	0.010
Cadmio	0.003	0.007	0.096
Cobre	0.021	0.059	0.172
Cromo	0.037	0.105	4.89
Fierro	0.054	3.07	0.009
Mercurio	0.0	0.003	0.655
Manganeso	0.134	0.395	0.190
Níquel	0.063	0.127	0.014
Plata	0.003	0.009	0.201
Plomo	0.030	0.116	0.008
Selenio	0.0	0.003	0.412
Zinc	0.087	0.250	97.4
Calcio	6.8	39	93.28
Magnesio	4.8	44	439
Sodio	7	223	

Nota: Todos los parámetros están reportados en mg/L excepto \*

(1) Realizado por método espectrofotométrico.

(2) Conductividad expresado en Micromhos/cm.

(3) Número más probable de colonias en 100 ml.

Tabla 1. Calidad del agua residual del interceptor Poniente <sup>(21)</sup>

## RESUMEN

Este trabajo forma parte del proyecto Estudio del Interceptor Poniente de la Ciudad de México, donde se aplicó el proceso básico de lodos activados de tipo continuo y del modelo cinético de Eckenfelder para la determinación de parámetros biocinéticos, como: remoción de sustrato (K y Sn), producción y pérdida de biomasa (a y b); mismos que se utilizaron para analizar el comportamiento de degradación aerobia propia del agua residual del IPCM. Por otro lado en éste sistema, durante el proceso de experimentación, se estudiaron algunos parámetros de operación y control, como fueron: caudal del influente (Q), carga orgánica (DBO y DQO), relación alimento-microorganismo (F/M), tiempo medio de contacto entre partícula suspendida y sistema aireado (TMRC y  $t_n$ ), así como características de sedimentación (SVI).

Para la realización de éste trabajo se utilizaron tres reactores continuos construidos en acrílico, en un medio aireado y agitado, donde se obtuvieron los datos experimentales. Dentro del proceso de muestreo se consideraron periodos de estiaje y lluvia, cuyos valores de carga orgánica fueron distintos, pero que fue importante considerarlos si se deseaba tener muestras representativas del caudal tratado.

Se evaluaron los parámetros obtenidos de acuerdo al porcentaje de remoción de contaminantes, a la velocidad de remoción y a la estabilidad del sistema trabajado. Donde se obtuvo, en promedio, un porcentaje de remoción de contaminantes entre 78 % a 85 %, medido como DQO soluble. Por los resultados y análisis de los parámetros de operación y control de éste trabajo en relación a la estabilidad del sistema de lodos activados, en reactores a escala de laboratorio, se dan una serie de recomendaciones consideradas importantes para el diseño y optimización del proceso tratamiento de aguas residuales del IPCM.

**OBJETIVOS:**

Utilizar reactores de tipo continuo diseñados para el laboratorio de tratamiento de aguas y el proceso de lodos activados, para caracterizar las aguas del IPCM en términos de los siguientes parámetros: Remoción de Sustrato (K), Producción de Biomasa (a), Respiración Endógena (b) y Material no Biodegradable (Sn).

Proponer alternativas de operación en el manejo de reactores biológicos de tipo continuo, a escala de laboratorio para la optimización de procedimientos en el sistema de tratamiento por lodos activados.

## 1. MARCO TEORICO

### 1.1 Tratamiento de Aguas Residuales

#### 1.1.1 . Definición:

Un curso de agua se considera como contaminado cuando la composición o el estado de sus aguas son directa o indirectamente modificadas por la actividad del hombre, en una medida tal, que disminuye la facilidad de utilización para todos aquellos fines o algunos de ellos a los que podrían servir en estado natural.<sup>(10)</sup>

Las cuatro fuentes fundamentales de aguas residuales son:

- Aguas domésticas o urbanas.
- Aguas residuales industriales.
- Aguas residuales agrícolas.
- Aguas pluviales.

Los contaminantes en las aguas residuales son normalmente una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos. El aspecto fundamental resultante de la contaminación por compuestos orgánicos es la disminución de oxígeno como resultante de la utilización del existente en el proceso de degradación biológica de dichos compuestos.

En el caso de la contaminación derivada de la presencia de compuestos inorgánicos, el resultado más importante es su posible efecto tóxico, más que la disminución en oxígeno.



### 1.1.2 Contaminantes más importantes en el tratamiento del agua residual.

A continuación se describen los contaminantes de interés en el tratamiento del agua residual. Las normas que regulan los tratamientos secundarios están basadas en las tasas de eliminación de la materia orgánica, sólidos en suspensión y patógenos presentes en el agua residual. Gran parte de las normas implantadas recientemente, más exigentes, incluyen el control de la eliminación de nutrientes y de los contaminantes prioritarios. Cuando se pretende reutilizar el agua residual, las exigencias normativas incluyen también la eliminación de compuestos orgánicos refractarios, metales pesados y, en algunos casos, sólidos orgánicos disueltos.

**Sólidos en suspensión.** Los sólidos en suspensión pueden dar lugar al desarrollo de depósitos de fango y de condiciones anaerobias cuando se vierte agua residual sin tratar al entorno acuático.

**Materia orgánica biodegradable.** Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales, la materia orgánica biodegradable se mide, en la mayoría de las ocasiones, en función de la DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y de la DQO (demanda química de oxígeno). Si se descargan al entorno sin tratar su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas.

**Patógenos.** Pueden transmitirse enfermedades contagiosas por medio de los microorganismos patógenos presentes en el agua residual.

**Nutrientes.** Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten al entorno acuático, estos nutrientes pueden favorecer el crecimiento de una vida acuática no deseada. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, también pueden provocar la contaminación del agua subterránea.

**Contaminantes prioritarios.** Son compuestos orgánico o inorgánicos determinados en base a su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o toxicidad aguda conocida o sospechada. Muchos de estos compuestos se hallan presentes en el agua residual.

**Materia orgánica refractaria.** Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento. Ejemplos típicos son los agentes tensoactivos, los fenoles y los pesticidas agrícolas.

**Metales pesados.** Los metales pesados son, frecuentemente, añadidos al agua residual en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, y puede ser necesario eliminarlos si se pretende reutilizar el agua residual.

**Sólidos inorgánicos disueltos.** Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos se añaden al agua de suministro como consecuencia del uso del agua, y es posible que se deban eliminar si se va a reutilizar el agua residual.

### 1.1.3 Niveles de tratamiento de Aguas residuales.

El grado de tratamiento requerido para un agua residual depende fundamentalmente de los límites de vertido para el efluente.

**Tratamiento preliminar.** Tiene por objeto eliminar sólidos de tamaño considerable como piedras, papeles, plásticos, madera, lodos, arena, etc. Se efectúa por medio de un desarenador, que es un canal de velocidad constante. Los sólidos grandes que no han quedado detenidos por medio de rejillas así como las arenas y los lodos se sedimentan.

**Tratamiento primario.** Consiste en la separación de los sólidos suspendidos más pesados que el agua. Se realiza en tanques circulares o rectangulares.

**Tratamiento secundario.** Elimina la materia orgánica disuelta en el agua con tal propósito se puede emplear el método químico o procedimientos biológicos.

**Tratamiento terciario.** Implica la purificación del agua para volverla a utilizar nuevamente. El tratamiento se selecciona de acuerdo con el uso a que se destine esa agua. Por ejemplo cuando se va a utilizar el agua para el enfriamiento o el transporte de materiales no se le da ningún pretratamiento, pero si se desea utilizarla para generar vapor o lavar a presión, es necesario ablandarla y desoxigenarla. Para poder recircular agua en la industria alimentaria y en la del papel es necesario desmineralizarla y desinfectarla.

#### 1.1.4 Tratamiento Secundario.

Los métodos de tratamiento en los que predomina la aplicación de principios físicos se conocen con el nombre de operaciones unitarias. Los métodos de tratamiento en los que la eliminación de contaminantes se efectúa por actividad química o biológica se conocen como procesos unitarios. Los procesos y operaciones unitarias se agrupan para proporcionar lo que se conoce como tratamientos primarios y secundarios. En el tratamiento primario se emplean operaciones del tipo físico, tales como rejillas desarenadoras y sedimentación; para eliminar los sólidos en flotación y sedimentables que se encuentran en el agua residual. En el tratamiento secundario se utilizan procesos biológicos. El ciclo completo de tratamiento incluye tanto etapas aeróbicas como anaeróbicas, aunque las necesidades locales determinaran cuales de estas se realizarán.

La digestión aeróbica requiere de una vasta población de microorganismos de metabolismo activo, capaces de degradar productos orgánicos tanto solubles como coloidales y con una elevada tasa de conversión a  $\text{CO}_2$  y agua. Los sistemas aeróbios más comúnmente usados son los que a continuación se mencionan.

**Lodos Activados.** Sistema en que la materia orgánica se mantiene dentro de la masa del agua en suspensión y homogeneizada, bien por sistemas hidráulicos, mecánicos o inyección de aire.

**Lechos bacterianos.** Sistema en el que se incorporan elementos soportes, donde se fijan los lodos y los microorganismos, distribuyendo homogéneamente los alimentos (materia orgánica)

**Lagunas de Aireación.**<sup>(1)</sup> Este sistema es un recipiente de 8 a 16 pies de profundidad y con una área de varios acres, que es oxidado por medio de agitación u difusión de aire, tal que produce la biodegradación de compuestos orgánicos solubles. Constituye el método óptimo en climas cálidos y soleados. El tiempo de retención es de varias semanas, suficiente para que se forme un cultivo mixto de algas y bacterias.

**Contactores Biológicos Rotatorios.**<sup>(1)</sup> Estos están formados por numerosos discos de Plástico de gran tamaño, montados sobre un eje rotatorio con aproximadamente 40 % del volumen sumergido en el tanque de agua residual. Los discos soportan una película de microorganismos de 1 a 4 mm. Mientras que el contactor rotatorio acarrea cierta cantidad de agua residual hacia el aire, permite a los microorganismos, oxidar los compuestos orgánicos solubles. Las fuerzas de arrastre del agua eliminan el exceso de biomasa, esta es recolectada en el fondo de un clarificador.

## 1.2 Proceso de Lodos Activados

### 1.2.1 Orígenes y fundamentos del sistema

El proceso de lodos activados ha sido siempre utilizado para el tratamiento de las aguas residuales industriales así como urbanas, desde hace aproximadamente un siglo.

El diseño de las plantas de tratamiento de aguas por lodos activos se llevó a cabo fundamentalmente de una forma empírica.<sup>(7a)</sup> Sólo al comienzo de los años setenta se desarrolló una solución más racional para el diseño del sistema de lodos activos.

El fundamento del sistema es la propiedad que tiene el agua residual, despejada de sus sólidos sedimentables y sometida durante algún tiempo a la inyección o mezcla de aire finamente dividido, de producir la coagulación de aquellas sustancias en suspensión que, por su estado, son incapaces de sedimentar solas. Coagulación que determina su sedimentación.

Los lodos activados están formados por flóculos parduscos, que mediante un examen microscópico de este lodo revela que está formado por una población heterogénea de microorganismos, que cambian continuamente en función de las variaciones de la composición de las aguas residuales y de las condiciones ambientales. Los microorganismos presentes son bacterias unicelulares, hongos, algas, protozoos y rotíferos. Existen especies de *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Acheomobacter* y *Brevibacterium*, así como también, protozoos ciliados como *Vorticella Spp.* que se cree son predadores de las bacterias, ejerciendo un control sobre su número y ayudando por tanto, a la estabilidad de los flóculos. Una bacteria común en la población de lodos activados es *Zoogloae ramigera*.<sup>(7)</sup> Es quizá la más importante característica de estos organismos y de otros en el lodo, la propiedad de sintetizar un polisacárido gel. Este gel tiende a aglomerar en flóculos que contienen carbono, nitrógeno y fósforo dentro de su estructura, con una relación S : 1: 0.15.<sup>(34,12)</sup>

### 1.2.2 Mecanismos del Proceso de Lodos Activados<sup>(35)</sup>

El principio básico del proceso consiste en que las aguas residuales se pongan en contacto con una población microbiana mixta, en forma de suspensión floculenta en un sistema aireado y agitado. La materia en suspensión y la coloidal se eliminan rápidamente de las aguas residuales por adsorción y aglomeración en los flocúlos microbianos. Esta materia y los nutrientes disueltos se descomponen, luego más lentamente por metabolismo microbiano; proceso conocido como **estabilización**; en este proceso parte del material nutriente se oxida a sustancias simples como el anhídrido carbónico, proceso denominado **mineralización**; y parte se convierte en una materia nueva celular microbiana, proceso llamado **asimilación**. Otra fracción de la masa microbiana se descompone también de la misma manera; en donde a este proceso se le llama **respiración endógena**.

El proceso oxidativo suministra la energía necesaria para que se realicen las operaciones de adsorción y asimilación.

Una vez que alcanza el grado de tratamiento que se desea, la masa microbiana floculenta conocida como el **lodo**, se separa del agua residual por asentamiento, en un espacio separado, especialmente diseñado.

A la etapa de separación se conoce también como **clarificación, asentamiento o sedimentación**. El sobrenadante de la etapa de separación resulta ser entonces, el agua residual tratada y debe estar virtualmente libre de lodos. Una porción de los lodos se extrae para su descarga, y se conoce como **lodos activados desechados**. En un sistema balanceado, el lodo desechado representa la cantidad neta de masa microbiana producida por asimilación en la etapa de aireación, y es efectivamente, el **concentrado de contaminación** del sistema.

### 1.3 Sistema de tratamiento Biológico

#### 1.3.1 Objetivo del Proceso Biológico.

La oxidación biológica consiste en la oxidación del material orgánico soluble (medido como demanda bioquímica de oxígeno) por medio de microorganismos en condiciones aerobias.

Los procesos de acción de los microorganismos sobre la materia orgánica dependen de la forma de captación de oxígeno directo del gas disuelto en las aguas por descomposición de la materia orgánica. Los microorganismos pueden clasificarse, con base en este concepto, en aerobios, anaerobios y facultativos.<sup>(15)</sup>

La energía obtenida de las reacciones bioquímicas se utiliza en la síntesis de la materia orgánica transformada en nuevas células. En esta acción de síntesis, los compuestos orgánicos, con sus contenidos en C, H, O, P, K, Na, se transformarán en seres vivos, microorganismos que contienen en peso:

Carbono	50-55 %
Oxígeno	25-30 %
Nitrógeno	10 %
Hidrógeno	6-7 %
Fósforo	1 %

Estos microorganismos tienen una composición que puede semejar a formulaciones como: <sup>(27)</sup>



El proceso biológico consiste, en resumen, en la utilización de sustancias orgánicas, elementos nutritivos y oxígeno, para originar energía vital y materia viva, es decir, nuevos microorganismos que crecen y se multiplican.

Un esquema de la depuración biológica consiste en un reactor, donde los microorganismos transforman la materia orgánica en agua depurada, productos volátiles como  $CO_2$ ,  $NH_3$  y materia viva. Es necesario introducir  $O_2$ , indispensable fuente energética para el metabolismo de microorganismos aerobios, para lograr una depuración rápida, y evitar reacciones anaerobias.

La carga de los efluentes líquidos se mide por la concentración de sólidos en suspensión (SS), junto con la concentración de material orgánico que se puede oxidar químicamente por ebullición con dicromato de potasio y ácido sulfúrico concentrado DQO. La DQO límite para un efluente que se descargue en un curso natural de agua, es generalmente del orden de 30 – 60 mg/ L.<sup>(7)</sup>

### 1.3.2 Mecanismos de tratamiento Biológico<sup>(12)</sup>

Actualmente el tratamiento biológico de las aguas residuales no se concibe y practica como una sola operación sino una combinación de operaciones interrelacionadas. La primera operación cronológicamente, y en importancia es la transferencia de las impurezas desde las aguas residuales al flóculo u otra forma de la biomasa por contacto interfacial, así como las



adsorciones y absorciones asociadas. Esta operación es rápida y efectiva si la interfaz existente entre el líquido y la biomasa es grande. Por consiguiente, es importante la extensión del contacto.

La segunda cronológicamente, igualmente importante, es la preservación de la calidad del contacto. Esta se logra principalmente por la oxidación de la materia orgánica y la síntesis de células nuevas. Se adsorben las sustancias que se concentran en las superficies; las sustancias adsorbidas son descompuestas por las enzimas de las células vivientes que se acumulan; se sintetizan células nuevas; y se deslavan los productos finales de la descomposición hacia las aguas o bien, escapan a la atmósfera. El ingreso de las sustancias en la célula exige la intervención de un mecanismo adecuado de transporte. Parece ser que en la mayoría de los casos se trata de enzimas específicas para el sustrato, que son inducibles y se conocen con el nombre de permeasas.<sup>(25)</sup>

En una tercera operación, la conversión de la biomasa en sólidos sedimentables o removibles en otra forma procede en sincronía con la preservación de la calidad del contacto y determina la efectividad global del proceso.

### 1.3.3 Condiciones para la Biodegradación

La clave para la valoración del destino final de los contaminantes orgánicos, en el medio ambiente es la evaluación realista de su susceptibilidad a la mineralización (conversión completa a dióxido de carbono y agua). Se cree que la fotooxidación y otros mecanismos abióticos juegan sólo un papel minoritario y la mineralización se produce generalmente como consecuencia de la actividad microbiana.

Los compuestos orgánicos pueden ser biodegradables (transformables por mecanismos biológicos que pueden conducir a la mineralización completa), persistentes (no sufren biodegra-

dación en un ambiente particular o bajo un conjunto de condiciones experimentales específicas) o recalcitrantes (intrínsecamente resistentes a la biodegradación) La mayoría de los compuestos naturales o biogénicos son biodegradables, mientras que los fabricados por el hombre o los xenobióticos pueden ser biodegradable, persistentes o recalcitrantes.<sup>(7)</sup>

La biodegradación en un medio ambiente particular requiere la presencia de los microorganismos apropiados. El medio ambiente también debe ser apto tanto para el crecimiento de estos microorganismos como para que cualquier reacción química de transformación transcurra con una velocidad significativa. Existen factores importantes que influyen en la biodegradación de los compuestos orgánicos y que enseguida se mencionan.

#### **1.3.4 Factores que Afectan el Tratamiento Biológico**

Existen una serie de factores que influyen en la biodegradación de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

##### **a) Factores Químicos**

Los factores del medio ambiente Tabla 2, ejercen su influencia primaria porque regulan o definen las condiciones bioquímicas en las que las enzimas catabólicas sintetizadas son activas fisiológicamente.

Las enzimas son activas en estado coloidal, pudiendo inhibir su actividad las sustancias presentes en las aguas en forma de sales insolubles, iones de metales pesados, reactivos alcaloides, el cloro y sus compuestos. Esta acción de los inhibidores puede actuar sobre los microorganismos destruyéndolos, o dejándolos en estado latente.

	<b>CONSECUENCIAS</b>	
<b>PROPIEDADES ESTRUCTURALES</b>	- Peso molecular o tamaño.	- Actividad de transporte limitada.
	- Naturaleza polimérica.	- Requiere metabolismo extracelular.
	- Aromaticidad.	- Las enzimas requieren Oxígeno.
	- Substitución de halógeno	- Pérdida de enzimas deshalogenadoras
	- Solubilidad.	- División competitiva.
	- Origen Xenobiótico.	- Evolución de nuevas rutas degradativas.
<b>FACTORES AMBIENTALES</b>	- Toxicidad.	- Inhibición enzimática, daño celular.
	- Oxígeno disuelto.	- Sensibilidad y requerimiento enzimático de oxígeno.
	- Temperatura.	- Temperatura mesofílica óptima.
	- Carbono disuelto.	- Depende de la concentración del contaminante.
	- pH.	- pH óptimo reducido.
	- Superficies.	- Competencia por el sustrato.
	- Luz.	- Aumento fotoquímico.
- Nutrientes y algunos otros elementos.	- Limitación en el crecimiento y síntesis enzimática.	

**Tabla 2. Factores Químicos que influyen en la Biodegradabilidad de Contaminantes Orgánicos<sup>(30)</sup>**

FACTOR BIOLÓGICO	CONSECUENCIAS
Orientación Enzimática.	- Baja frecuencia degradativa de especies.
Especificidad enzimática.	- Sustratos análogos no metabolizados. - Reaclimatación.
Codificación del plásmido enzimático.	- Baja frecuencia degradativa de especies. - Inestabilidad.
Regulación enzimática.	- Control de la síntesis y catabolismo enzimático.
Competitividad.	- Extinción o disminución de la densidad de poblaciones.
Selección de hábitat	- Pérdida del establecimiento de poblaciones degradativas.
Control de la población.	- Disminución de la densidad de población de organismos biodegradativos.

**Tabla 3. Factores Biológicos que influyen en la Biodegradabilidad de los contaminantes orgánicos<sup>(30)</sup>**

Se desprende en consecuencia, que para que se desarrolle un proceso adecuado biológico, se precisa:

- 1.- Proporcionar un estado coloidal y homogéneo para la acción de los microorganismos.
- 2.- Evitar en los vertidos, a ser tratados biológicamente, la presencia de sales o elementos que pueden inhibir el proceso.

#### **b) Factores Biológicos**

Los factores biológicos Tabla 3, que interactúan con los factores químicos, además modulan la biodegradación de los contaminantes orgánicos y la realización anticipada de los sistemas de tratamiento biológico.

Muchos de estos factores están relacionados con la capacidad biodegradativa de enzimas celulares. Las enzimas biodegradativas no están distribuidas en todas las especies bacterianas y muchas de las enzimas tienen un rango estricto de especificidad. La especificidad de las enzimas degradativas se incrementa en todas las vías bioquímicas altamente reguladas que por último producen metabolitos simples que pueden usarse para generar energía celular y carbono. Muchas de las rutas bioquímicas pueden ser codificadas exclusivamente en el plásmido extracromosomal del DNA.<sup>(30)</sup>

#### **c) Actuación Recíproca Microorganismos-Materia Orgánica.<sup>(25)</sup>**

La actuación de los microorganismos junto a la materia orgánica a de ser facilitada. Puesto que el microorganismo es un elemento pequeño, en condiciones óptimas la partícula orgánica debería tener las dimensiones adecuadas para poder pasar a través de las membranas de células y bacterias.

**d) Cantidad mínima de nutrientes<sup>(15,25)</sup>**

- 1.- El proceso tendrá lugar siempre que el alimento sea suficiente para los microorganismos que actúan en el proceso como bacterias, protozoos, hongos, etc.
- 2.- Las aguas residuales domésticas pueden considerarse biodegradables, y equilibradas en los componentes para alimentar los microorganismos, pero en algunos vertidos industriales no ocurre así. La condición adecuada, para que un agua residual pueda depurarse, es que la cantidad de nutrientes sea suficiente.

**1.4 Modelo Básico del Proceso Convencional de Lodos Activados<sup>(1,19,22)</sup>**

En el modelo más simple para definir los procesos primario y secundario se deben considerar tres componentes principales: biomasa (lodo activado), sustrato (materia orgánica soluble), y oxígeno disuelto.

El proceso de lodos activados en continuo, considerando la recirculación del lodo, puede representarse como se muestra en el Esquema 1.

El RFTCA (reactor de flujo continuo en tanque agitado) fue utilizado como modelo de reactor biológico.

A continuación se describe el diagrama, prestando especial atención a las concentraciones de:

### **Sustrato**

La alimentación inicial, esto es, el agua residual a tratar [corriente 1], penetra en el proceso con un valor de la DBO o DQO soluble, que se indica como  $S_0$ . Se requiere de Oxígeno, para la oxidación del material orgánico biodegradable presente en el agua residual. El objetivo del tratamiento es reducir el valor  $S_0$  a  $S_e$  (DBO o DQO del efluente en la corriente 4)

El lodo biológico  $\Delta x_v$ , se forma continuamente en el reactor. La concentración de DBO soluble en el líquido del reactor se simboliza por  $S_e$ . Bajo condiciones de estado estacionario y mezcla completa, la concentración de la DBO soluble en el efluente del reactor [corriente 3] es, así mismo, igual a  $S_e$ .

El efluente del reactor para el clarificador secundario, tiene la misma concentración de DBO soluble [corriente 5] y en el efluente final [corriente 4], esto es,  $S_e$ .

La descarga del clarificador se divide en dos corrientes: Purga [corriente 6] y lodo recirculado [corriente 7]. Para estas dos corrientes, la concentración de DBO soluble tiene el mismo valor,  $S_e$ .

### **Biomasa**

En el proceso convencional de lodos activados la concentración de lodo biológico, es simbolizada por  $X_{v,a}$  en la que el segundo subíndice "a" se refiere al reactor aireador, esta comprendida normalmente entre 2000 y 3000 mg/L. Ya que se trabaja bajo condiciones de mezcla en el reactor, los sólidos en suspensión en él corresponden a sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado (SSVLM). Análogamente, los sólidos en suspensión no volátiles en el reactor, estando también completamente mezclados, se indican por sólidos no volátiles en suspensión en

el licor mezclado (SSNVLN). Los sólidos totales en suspensión en el reactor se indican mediante SSTLM, entonces:

$$SSTLM = SSVLM + SSNVLN$$

En la concentración de SSV en la alimentación inicial es despreciable en muchos casos, ya que en esta etapa no se ha efectuado una cantidad apreciable de aireación. Los SSV se producen continuamente en el reactor debido a la síntesis de materia biológica y se purgan continuamente en el efluente.

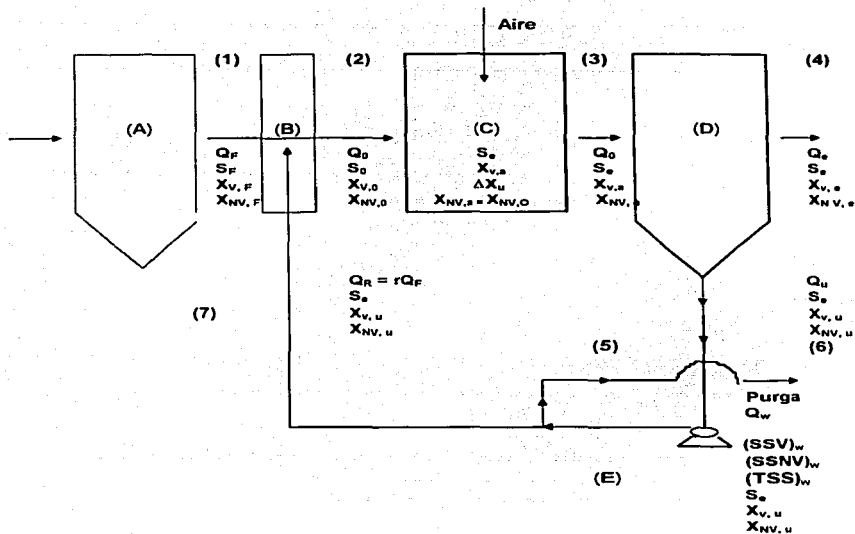
Con objeto de mantener una concentración constante de SSVLM en el reactor, la mayor parte de la carga del clarificador se recicla. La relación de reciclado "r" se calcula mediante un balance de materia que tiene en cuenta la necesidad del mantenimiento de la concentración seleccionada  $X_{vs}$  de SSVLM dentro del reactor en todo momento. Debido a la síntesis de materia biológica hay una producción neta de SSVLM en el reactor  $\Delta x_v$ .

Por lo tanto, para mantener una concentración de SSVLM, es necesario purgar del sistema una masa de SSVLM igual a esta producción neta  $\Delta x_v$ . Esto se lleva a cabo principalmente mediante la purga intencionada de lodo [corriente 6].

La concentración de SSVLM en el efluente del reactor [corriente 3] es  $X_{vs}$ , ya que se supone condiciones de equilibrio de mezcla completa.

El efluente del reactor fluye al clarificador secundario. La descarga de este último [corriente 5] es un lodo que contiene una concentración de SSV expresada por  $X_{vs}$  ( $X_{vs} > X_{vs}$ ). Las concentraciones de SSV en la purga y en el lodo reciclado son, así mismo iguales a  $X_{vs}$ . En el efluente final del clarificador secundario la concentración de SSV  $X_{vs}$  es normalmente despre-





**EQUIPO:**

- A) Clarificador Primario
- B) Mezcla de Aguas Decantadas y Recirculadas
- C) Reactor Biológico Aerobio
- D) Decantación Secundaria
- E) Recirculación de Lodos y Extracción

**CORRIENTES:**

- 1) Alimentación Fresca
- 2) Alimentación Combinada
- 3) Efluente del Reactor
- 4) Efluente Final
- 5) Descarga del Clarificador
- 6) Purga
- 7) Lodo Reciclado

Nota: Ver Anexo I para definición de símbolos

**Esquema 1. Proceso de Lodos Activos en Continuo.**

cialable, ya que el clarificador se proyecta comúnmente para una retención de sólidos aproximadamente del 100 %.

### ***Oxígeno Disuelto.***

El conocimiento de las necesidades de oxígeno para efectuar un consumo específico de DBO o DQO resulta imprescindible a la hora de diseñar el equipo de aireación. Por lo tanto, se requiere oxígeno con dos fines :

- 1) Oxidar el sustrato con objeto de proporcionar energía a las células
- 2) En el proceso de respiración endógena

#### **1.4.1 Parámetros de Operación y Control <sup>(24)</sup>**

Mediante el control de diferentes parámetros se puede dirigir el proceso que se desarrolla en el sistema; para ello se identifican dos tipos de control:

#### ***Control biológico***

Consiste en mantener en el valor deseado:

- 1.- La actividad de los microorganismos, midiendo su compuesto fundamental ATP (trifosfato de adenosina).
- 2.- El oxígeno incorporado y consumido por respiración.
- 3.- La producción de CO<sub>2</sub>.

### **Control fisico-químico**

En este caso se procura controlar:

- 1.- La materia de entrada y salida, la consumida, la volátil y la inerte.
- 2.- La DBO o DQO de entrada, salida, y la consumida. Así como el balance de oxígeno

Por otro lado para dimensionar los elementos básicos de una planta de tratamiento biológico; es necesario obtener los parámetros que describen el comportamiento del sistema de interés, lo cual se puede hacer mediante:

- 1) El apoyo en casos previamente estudiados, inclusive a nivel de planta.
- 2) Llevar a cabo pruebas de laboratorio para reproducir en condiciones idénticas las fases del proceso de interés.

A continuación se presentan los parámetros correspondientes a un sistema continuo:

#### **Concentración de la DBO y DQO soluble <sup>(12,17,31)</sup>**

El diseño de las plantas de lodos activos se basa en el consumo de la DBO o DQO soluble. Este consumo es el resultado del proceso de oxidación biológica que se presenta en el reactor.

#### **DBO**

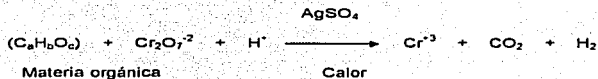
La demanda biológica de oxígeno (DBO), es la cantidad de oxígeno requerido durante la oxidación de materia orgánica e inorgánica, por un cultivo aeróbico bacteriano. Este parámetro mide los efectos combinados de las sustancias putrescibles en solución. El DBO efectúa la



oxidación del material carbónico orgánico y la del material nitrado. Debido a que una estabilización completa requiere de mucho tiempo, se utiliza DBO<sub>5</sub>, que mide la cantidad de oxígeno disuelto en una muestra de agua, antes y después de 5 días de incubación a 20°C.

### DQO

Una medida relacionada con el proceso anterior es la demanda química de oxígeno (DQO), se define como la cantidad de oxígeno (mg/L) requerido para oxidar la fracción orgánica e inorgánica susceptible a la oxidación por dicromato de potasio, en una solución ácida.



La DQO implica también los compuestos orgánicos no biodegradables. Por lo que al igual que la DBO es una medida imperfecta del contenido de materia orgánica.

### Concentración de los Sólidos Suspendidos Totales (SST) <sup>(22,31)</sup>

Los sólidos suspendidos totales (mg/L) incluyen todos los materiales sólidos, orgánicos e inorgánicos. Los sólidos suspendidos volátiles (SSV), corresponden a los lodos biológicos constituidos por una población heterogénea de microorganismos. La determinación experimental de los SSV se lleva a cabo midiendo la pérdida de peso de los sólidos totales en suspensión después de incineración a 600°C. Esta pérdida de peso corresponde principalmente a la volatilización del lodo biológico. Prácticamente la mayoría de los compuestos orgánicos pueden ser totalmente oxidados mientras los inorgánicos podrán permanecer como cenizas. Los sólidos remanentes después de la incineración a 600°C corresponden a los sólidos en suspensión no volátiles (SSNV). Los SSVLM,

es una medida indirecta de la cantidad de microorganismos activos existentes en un momento dado en el tanque de aireación.

$$SST = SSV + SSVN$$

### **Consumo de Oxígeno**

Para que ocurran las reacciones químicas de la materia orgánica y se dé la respiración de los microorganismos, se precisa de la introducción de oxígeno en el proceso biológico, en una cantidad que depende de:

- a) La DBO del agua que se va a tratar.
- b) La cantidad de lodos activos que hay en el tanque.

Se ha visto que al incorporar un exceso de aire (incrementando con ello el oxígeno disuelto) se presenta el fenómeno de "Bulking"; el cual también es afectado por factores, tales como: la carga orgánica ( $F / M$ ), tiempo medio de retención celular (TMRC) y régimen de flujo. En el fenómeno de "Bulking" los lodos contienen exceso de gas, disminuye la densidad y no sedimentan. <sup>(29,34)</sup>

### **Carga orgánica ( $F/M$ ) <sup>(22)</sup>**

Expresa la relación que existe entre la cantidad de materia orgánica aplicada como alimento en el tanque de aireación por día y la cantidad de microorganismos existentes. Se expresa como:

$$F/M = S_o / X_{v,a}t_h$$

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

F/M : relación alimento-microorganismos (días<sup>-1</sup>)

S<sub>o</sub> : materia orgánica en términos de DQO o DBO del influente (mg/L)

X<sub>v,a</sub> : SSVLM en el reactor en mg/L

T<sub>h</sub> : tiempo de residencia en el reactor (días)

### **Tiempo Medio de Retención Celular (TMRC) <sup>(17)</sup>**

El tiempo promedio en días que un microorganismo permanecerá en el proceso de tratamiento secundario antes que éstos sean drenados como desechos de lodo.

$$TMRC = \frac{V \times SSVLM}{Q \times SSV}$$

Donde:

TMRC : tiempo medio de retención celular (días)

V : volumen del reactor de aeración (L)

SSVLM : concentración de los sólidos suspendidos en el reactor de aeración (mg/L)

Q : gasto de aguas residuales (L/día)

SSV : concentración de sólidos suspendidos en las aguas residuales que entran al reactor de aeración (mg/L)

### **Tiempo de Retención Hidráulico (T<sub>h</sub>) <sup>(22)</sup>**

Es el tiempo que transcurre entre la entrada del agua residual a un tanque y su salida de él, se acostumbra a reportarlo en horas. Se expresa así:

$$T_h = \frac{V}{Q_o}$$

### ***Índice Volumétrico de Sedimentación (SVI) <sup>(22)</sup>***

Este índice es el volumen en ml que ocupa un gramo de lodos activados del licor mezclado (SSLM), una vez que se ha dejado sedimentar, dicho licor durante 30 minutos, en una probeta graduada de 1000 ml.

$$SVI = \frac{SV}{SSLM} \times 1000 \text{ mg/gr}$$

Donde:

SVI = Índice Volumétrico del Lodo, ml/ gr.

SV = Volumen de sólidos sedimentados en un cilindro, después de 30 min, ml/ L.

SSLM = Sólidos suspendidos del licor mezclado, mg/L.

Se refiere a la cantidad de agua residual en ml/min. que ingresa a un sistema de tratamiento.

#### **1.4.2 Relaciones Cinéticas <sup>(18,22)</sup>**

El estudio de la cinética del tratamiento biológico aerobio conduce a determinar la velocidad a la cual los microorganismos degradan a un residuo específico y, por lo tanto, suministran la información básica necesaria para dimensionar el tamaño de los reactores biológicos, así como las condiciones para su manejo. En términos generales, dicha velocidad de degradación depende de la concentración del sustrato, de los nutrientes y de la temperatura del sistema. En la curva de crecimiento de las bacterias se identifican las cuatro zonas siguientes:

**a) De Retardo**

Corresponde al tiempo en cual los microorganismos se aclimatan al nuevo medio de vida; es un proceso lento.

**b) De Crecimiento**

En esta zona se dice que la célula se divide a velocidad constante, la concentración de SSVLM aumenta al principio ( desde el tiempo 0 al tiempo  $t_c$ , Esquema 2), en ella hay alimento en exceso y la velocidad de crecimiento corresponde a síntesis de nuevas células de microorganismos, llamada como "fase de síntesis".

**c) Estacionaria**

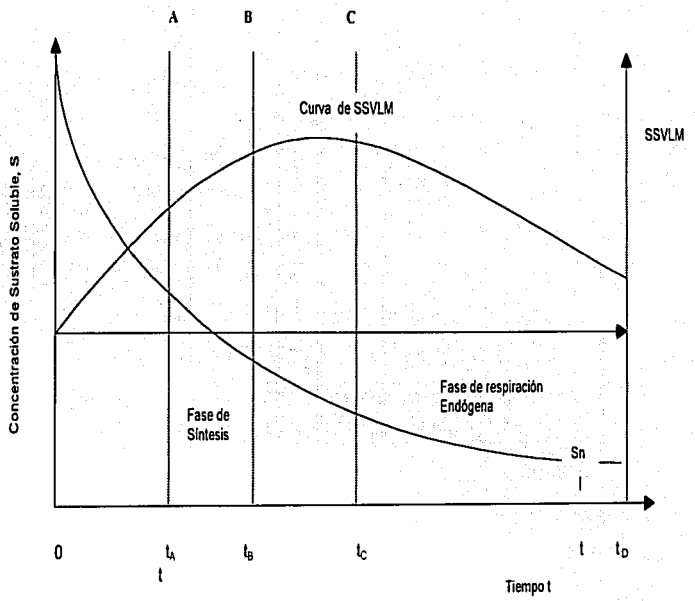
Se caracteriza por un crecimiento nulo de los microorganismos, como consecuencia de la constancia del alimento. El máximo de la curva SSVLM corresponde al tiempo  $t_c$ .

**d) De Decrecimiento.**

Se le llama también "fase de respiración endógena", en ella se termina el alimento y comienza la escasez; los microorganismos consumen primero sus propias reservas de protoplasmas, y posteriormente unos sirven de alimento a otros. Después del tiempo  $t_c$  la concentración de SSVLM desciende ya que la velocidad de destrucción de células de microorganismos excede la síntesis de nuevas células.

En el Esquema 2. se presentan, también, curvas típicas de disminución de la concentración de sustrato soluble  $S$  y variación de la cantidad de SSVLM con el tiempo. La concentración





Esquema 2. Curva de crecimiento de los Microorganismos (SSVLM) y Concentración de sustrato soluble en función del tiempo

de sustrato soluble, del agua residual, que es una medida de la concentración de materia orgánica, decrece con el tiempo conforme dicha materia orgánica se oxida. Se alcanza un plato correspondiente a la cantidad de materia no biodegradable ( $S_n$ ). Si se utiliza la DBO para medir la concentración de sustrato,  $S_n = 0$ , ya que al tiempo infinito todo el sustrato biodegradable se oxida. Al utilizar DCO es posible tener  $S_n \geq 0$  correspondiendo a sustrato que no es biológicamente biodegradable pero que puede oxidarse químicamente mediante  $K_2Cr_2O_7$ .

Los tiempos  $t_A$ ,  $t_B$  y  $t_C$ , corresponden a valores típicos para procesos en reactores continuos. La línea B, corresponde al proceso convencional de lodos activos. En este caso, hay una producción neta de SSVLM (pendiente positiva de la curva SSVLM en el punto de intersección con la línea B y con la curva de la DBO, donde los valores en régimen estacionario,  $S_n$  y  $X_{v, s}$ , para el caso de reactor continuo operando con un tiempo de residencia  $t_B$ , se encuentran normalmente dentro de los intervalos siguientes: <sup>(22)</sup>

$S_n$  = corresponde a una reducción de la DBO del 85% al 95%.

$X_{v, s}$  = 2000 – 3000 mg/L

La descripción clásica del crecimiento bacteriano se refiere al comportamiento en cultivo tipo, tanto de microorganismos unicelulares como de los que presentan micelio (filamentosos).

El crecimiento en un cultivo tipo se puede detener por el agotamiento de un nutriente y/o la acumulación de un producto tóxico. Sin embargo, si el medio de cultivo se diseña de tal modo que el crecimiento esté limitado por la disponibilidad de nutrientes y la presencia mínima de agentes tóxicos, el crecimiento puede propagarse en forma controlada mediante la adición de una alícuota de medio fresco al recipiente. Si el medio fresco se añade constantemente a una velocidad adecuada y mediante un dispositivo de evacuación se desplaza el cultivo nuevo que lo sustituye, se establece así, un cultivo continuo.<sup>(4,7)</sup> Eventualmente en este sistema se alcanza un

estado de equilibrio ya que la pérdida de biomasa por evacuación es compensada por el crecimiento celular.

Las razones por las que se utiliza un sistema continuo en el tratamiento por lodos activados son las siguientes:

- a) Se opera bajo condiciones de un estado de equilibrio.
- b) Se puede aplicar un control automático.
- c) Es productivo.
- d) Puede mantenerse funcionando todo el día y la noche.

El cultivo continuo está muy relacionado con la cinética de crecimiento del microorganismo, puesto que utiliza la correlación entre la actividad metabólica y disponibilidad de sustrato. El control de suministro de sustrato a la célula permite fijar condiciones definibles de biosíntesis, metabolismo y regulación de la célula.

El mecanismo que constituye la base del efecto de control es, esencialmente, la relación tasa de crecimiento específico  $\mu$  y concentración del sustrato limitante  $S$ , demostrado por Monod en 1942.<sup>32,33</sup>

$$\mu = \mu_{\max} S / K_s + S$$

Donde  $K_s$  es la constante de utilización o de saturación, cuyo valor es numéricamente igual a la concentración del sustrato cuando es la mitad de  $\mu_{\max}$ .

Existe un punto que es de interés cuando se aplica la ecuación de Monod a los sistemas de tratamiento de agua y es cuando  $S \gg K_s$ , entonces la constante de crecimiento  $\mu$ , es

aproximadamente igual a  $\mu_{max}$ . Lo que convierte la ecuación de Monod en una ecuación de primer orden en biomasa. <sup>(18)</sup>

$$dx/dt = \mu x$$

Donde:  $dx/dt$  = Constante de crecimiento de la biomasa, mg/ (LT).

$\mu$  = Constante de crecimiento,  $T^{-1}$ .

$x$  = Concentración de biomasa, mg/ L.

Lo anteriormente indicado envuelve dos reacciones bioquímicas, una para el crecimiento y metabolismo normal de la bacteria y otras células. Otra para la oxidación de su material celular (respiración endógena).

Compuestos orgánicos solubles +  $a \cdot O_2$  + N-P  $\longrightarrow$  a células +  $CO_2$  +  $H_2O$  + Residuos solubles no degradables.

b Células +  $O_2$   $\longrightarrow$   $CO_2$  +  $H_2O$  + N + P+  $S_n$  Residuos no degradables

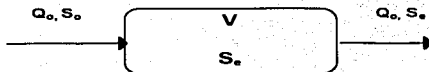
En la primera reacción "a" es la fracción de compuestos orgánicos removidos y que es convertida a nuevas células (mg SSV/mg de compuestos orgánicos), y  $a'$  es la cantidad de oxígeno (mg/ $O_2$  mg de compuestos orgánicos) necesaria para esto.

La velocidad de la segunda reacción es "b". Esta es la fracción de biomasa degradable oxidada por día, mientras que  $S_n$  representa el material que no se biodegradó. <sup>(1)</sup>

### 1.4.3 Parámetros Biocinéticos en Reactores Biológicos Aerobios

#### Velocidad específica de Consumo de sustrato

El modelo utilizado para la cinética del tratamiento biológico es el de Eckenfelder,<sup>(11)</sup> para lo cual, se describe los balances de materia donde se obtiene las ecuaciones de dicho modelo.



Considerando que el consumo de sustrato sigue la cinética de primer orden:

$$(ds/dt)_e = KS_e$$

$$(ds/dt)V = Q_o S_o - Q_e S_e$$

$$(ds/dt) = Q_o (S_o - S_e) / V$$

Si  $t_h = V / Q_o$  (tiempo de residencia hidráulica en el reactor)

Entonces:

$$(S_o - S_e) / X_{v,e} t_h = KS_e \quad (1)$$

La ecuación indica que la velocidad específica de consumo de sustrato<sup>(22)</sup> es proporcional a la concentración de sustrato.

Donde:

$S_o$  = Materia orgánica en términos de DQO ó DBO del influente en mg/ L.

$S_o$  = Materia orgánica en términos de DQO ó DBO del  
efluente en mg / L.

$t_h$  = Tiempo de residencia en el reactor, en días.

$X_{v,a}$  = SSVLM en el reactor en mg/ L.

K = Constante de velocidad de consumo ( $d^{-1} \times 1/ mg$ ).

***Balance de Materia para la Producción neta de Biomasa*** <sup>(22)</sup>

$$\text{Kg de SSVLM / d} = \Delta X_v = a (S_o - S_e) Q_o - b X_{v,a} V = a S_r Q_o - b X_{v,a} V$$

( Producción Neta)

(Producido)

(Resp End)

Si se divide toda la ecuación anterior por  $X_{v,a} V$  y se tiene que  $t_h = V/ Q_o$ .

Entonces:

$$\Delta x_v / X_{v,a} V = a[(S_o - S_e) / X_{v,a} t_h] - b \quad (2)$$

Donde:

$$\Delta x_v / X_{v,a} V = \text{Kg SSVLM}_{\text{Producidos}} / (d) \text{ Kg SSVLM}$$

a = Biomasa producida por consumo de sustrato,

Kg de SSVLM producidos /Kg de DQO total  
consumida

b = Biomasa perdida en la respiración endógena,

Kg de SSVLM oxidados / (d) Kg de SSVLM en  
el reactor.

$(S_o - S_e) / X_{v,a} t_h$  = Velocidad específica de consumo de  
sustrato.

## **2. MATERIALES Y METODOS**

### **2.1 Reactores Continuos a Escala de Laboratorio.**

Tomando en cuenta trabajos anteriores con reactores de tipo continuo, diseñados para el Laboratorio de Tratamiento de Aguas.<sup>(23)</sup> Se emplearon para la parte experimental, tres reactores de acrílico, cuyas capacidades eran de 11.1 L. y dos de 12.37 L., respectivamente. El Esquema 3, muestra el arreglo final del Sistema Continuo.

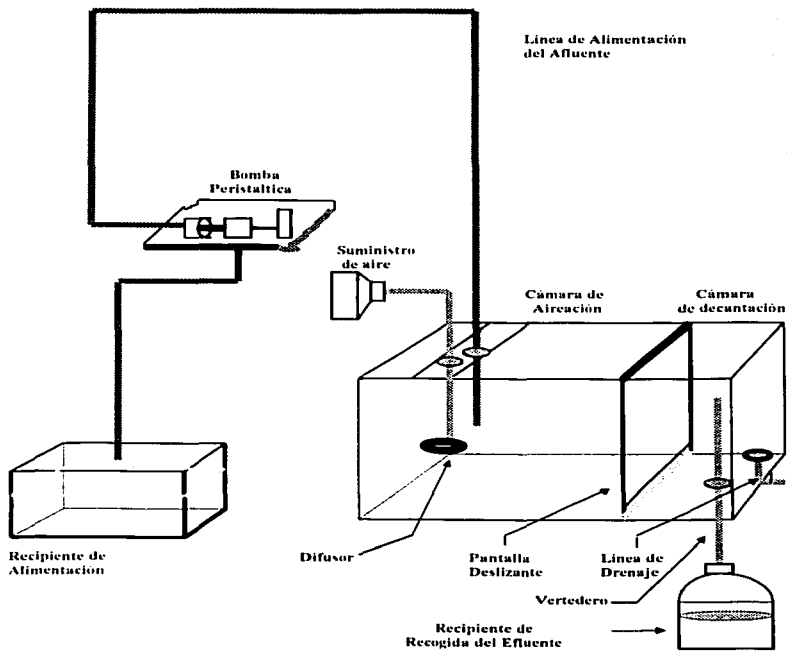
Cada reactor está dividido en dos secciones, llamadas cámaras de aireación y sedimentación, las cuales están separadas por una puerta deslizante, que puede suprimirse completamente. Dichas cámaras simulan el reactor y clarificador secundario de una planta real.

Se acondicionan bombas dosificadoras de aire con su respectivo difusor, para cada reactor. El aire es suministrado, como se muestra en el Esquema 3. Las burbujas de aire mantienen el contenido de la cámara de aireación en una condición de mezcla completa.

Una siembra de lodo activado es colocado en la cámara de aireación de cada reactor. El agua residual es alimentada a los reactores continuamente, desde un depósito constante mediante bombas peristálticas y fluyendo en botellones de vidrio de capacidad de 15 L., de recogida del efluente.

### **2.2 Acondicionamiento de Lodo Activado**

El lodo activado que se utilizó para el desarrollo de éste trabajo, es de una siembra que ya se tenía en contacto con el agua residual del interceptor poniente y que se obtuvo



Esquema 3. Reactor Continuo.



originalmente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Chapultepec.

En cada reactor se colocó el lodo activado y se alimentó con agua residual durante una semana, hasta obtener una concentración aproximada de 2000 ppm respectivamente.

### 2.3 Programa de muestreo

Mediante un programa de muestreo y uso de técnicas de análisis Tabla 4, se extrajeron un conjunto de datos que correspondieron a cuatro meses de experimentación ( Anexo II)

Las técnicas de análisis utilizadas para la parte experimental, fueron extraídas del Standard Methods the Examination of Waters and Wastewater.<sup>(2)</sup>

Análisis	Frecuencia	So <sup>a</sup>	Mi <sup>b</sup>	Se <sup>c</sup>
1.-DBO <sub>5</sub> (mg/L)	1/semana	X	-	X
2.-DQO (mg/L)	3/semana	X	-	X
3.-SS.SSVLM (mg/L)	3/semana	-	X	X
4.-pH	Diariamente	X	X	X
5.-Conductividad	Diariamente	X	X	X
6.-Sedimentabilidad	3/semana	-	X	-
7.-Acidez y Alcalinidad	3/semana	X	-	X

<sup>a</sup> Muestra extraída de la línea de alimentación (agua residual)

<sup>b</sup> Muestra extraída del reactor desprovisto de la pantalla.

<sup>c</sup> Muestra extraída del botellón, receptor del efluente.

Tabla 4. Parámetros Utilizados en la Experimentación.

### 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

#### Condiciones de Arranque

Para el arranque del sistema se tomo como apoyo la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales del interceptor poniente de los períodos de lluvia y estiaje; información del mes de mayo de 1991 a junio de 1993; que comprende valores de DBO en promedio estadístico: 220 mg/ L  $\pm$  31% de variación y con picos del orden de 314 mg/L y de DQO: 418 mg/L  $\pm$  34% de variación, con picos del orden de 674 mg/L.<sup>(21)</sup>

Dados los valores obtenidos como antecedente del estudio fisicoquímico correspondientes a DBO y DQO, y haciendo un análisis con estos valores de la biodegradabilidad del agua en estudio y del método de depuración a usar se tiene, que de acuerdo a la relación DBO/DQO:

Valores promedio:

DQO = 418 mg/ L

DBO/DQO = 1.9

DBO = 220 mg/L

Este valor, 1.9 de dicha relación, indica que el agua residual a tratar es biodegradable, pudiéndose utilizar sistemas biológicos como son lodos activados o lechos bacterianos.<sup>(13)</sup>

Así mismo para las condiciones de gastos de alimentación, se inició con tres diferentes gastos, éstos fueron similares a los ya trabajados en estudios anteriores con reactores continuos en el laboratorio de tratamiento de aguas <sup>(23)</sup> Tabla 5.

REACTOR	I	II	III
PARAMETROS			
Q (ml / min)	4.9	6.9	9.7
Volumen del tanque de aireación. (L)	11.1	12.37	12.37
DQO influente ( $S_0$ ) (mg / L)	349	349	349
SSVLM (mg / L)	720	790	1085
F/M (día <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	0.31	0.36	0.36
Tiempo Medio de retención celular. (día)	2	2	2

<sup>a</sup> Valores de F/M calculados con respecto a la concentración inicial de DQO.

**Tabla 5. Condiciones Iniciales de operación.**

Se manejó un segundo periodo de alimentación, Tabla 6, donde se modificaron los gastos para los reactores de 12.37 L ( Q= 10.4 y 17.4 ml/min, respectivamente) con el objeto de lograr mantener un valor óptimo de la relación F / M; lo cual se determinó en base a los resultados obtenidos en el primer periodo y con el objetivo de mantener lo más constante posible las condiciones de equilibrio como eran:

- El mantener una mezcla completa de los lodos activados con el agua residual,
- Lograr la aireación y agitación del licor mezclado durante el tiempo predeterminado (24 hrs.)
- Una separación completa de los lodos activados del licor mezclado.
- El suministro de oxígeno disuelto (O.D.) en el reactor.

REACTOR	I	II	III
PARAMETROS			
Q (ml/min.) <sup>a</sup>	4.9	10.4	17.4
Volumen del tanque de aireación. (L)	11.1	12.37	12.37
DQO influente (S <sub>0</sub> ) (mg / L)	796	796	796
SSVLM (mg / L) <sup>b</sup>	1030	975	755
F/M ( día <sup>-1</sup> )	0.49	0.99	2.13
Tiempo Medio de retención celular. (día)	3	2	1

<sup>a</sup> Modificación de flujos de alimentación, tomando en cuenta la concentración promedio de DQO de la primera etapa de experimentación con el propósito de corregir problema de "Bulking".

<sup>b</sup> Valores de SSVLM para flujos de alimentación finales

**Tabla: 6. Condiciones de operación.**

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Obtención y Procesamiento de Datos Experimentales.

Del total de valores obtenidos durante cuatro meses en el laboratorio, se utilizaron 10 datos en promedio por reactor y el promedio de éstos, correspondieron a: concentraciones del influente ( $S_0$ ) y efluente ( $S_e$ ), ambas medidas como DQO (mg/L); concentración del lodo biológico ( $X_{b,t}$ ) y producción de lodos ( $\Delta X_{b,t}$ ). Las cuales fueron utilizadas para la elaboración de las Tablas 7 y 9, según el modelo matemático de Eckenfelder, para Cinética de Consumo de Sustrato y Cinética de Producción de Biomasa, respectivamente.

Reactor	Q (L/día)	DQO $S_0$ (mg/L)	DQO $S_e$ (mg/L)	$X_{b,t}$ (mg/L)	$t_r = V/Q$ (día)	$S_0 - S_e$ (mg/L)	$X_{b,t}$ (mg/L)	$S_0 - S_e / X_{b,t}$ (día <sup>-1</sup> )
I	7	309	49	876	1.58	260	1384	0.18786
II	10	347	59	1361	1.23	288	1674	0.1720
III	14	320	48	1177	0.88	272	1040	0.2615
IV	15	554	91	1211	0.82	463	999	0.4634
V	25	586	131	848	0.49	455	420	1.0833

\* Para el cálculo de constantes biocinéticas y facilitar el trabajo en el laboratorio, se utilizó la DQO ya que se puede obtener en horas y la DBO se obtiene en 5 días.

Tabla 7. Valores promedio para Cinética de Consumo de Sustrato.

Los datos de Cinética de Consumo de Sustrato se aplicaron en la ec. 1 :

$$(S_0 - S_e) / X_{v,a} t_n = K(S_e - S_n)$$

Para la obtención de la constante de velocidad de consumo  $K = 0.01031 \text{ día}^{-1}$  que mediante la representación de  $(S_0 - S_e) / X_{v,a} t_n$  en la Gráfica: 1, indica la velocidad específica de consumo de sustrato en el reactor continuo por unidad de masa, con unidades de: mg DQO consumida / (días)(mg SSVLM), en función de  $S_e$ , con  $r = 0.96$ . Como se utilizó el parámetro de DQO para medir la concentración de sustrato la línea no pasa por el origen, cruza un punto de la abcisa que es  $S_n = 30.78 \text{ mg/L}$  o concentración del material no biodegradable (DQO residual).

PARÁMETRO	NOMENCLATURA	VALOR	UNIDADES
Remoción de Sustrato.	K	0.01031	día <sup>-1</sup> x l / mg
Producción de Biomasa.	a	0.00301	mg MLVSS / mg DQO
Respiración Endógena.	b	0.0131	día <sup>-1</sup>
Material no Biodegradable	Sn	30.78	mg / L

Tabla 8. Parámetros Biocinéticos.

Reactor	Q l/día	$\Delta X_v$ (mg/día)	$X_{v,0}$ (mg/L)	Volumen (L)	$\Delta X_v / V$ (mg / L . día <sup>-1</sup> )	$(\Delta X_v / V) / X_{v,0}$ (día)	$S_0 - S_e / X_{v,0} \cdot t$ (día <sup>-1</sup> )
I	7	110	876	11.1	9.9099	0.01131	0.18786
II	10	269	1361	12.37	21.7462	0.01598	0.1720
III	14	158	1177	12.37	12.7728	0.0108	0.2615
IV	15	158	1211	12.37	12.7728	0.01055	0.4634
V	25	109	848	12.37	8.8116	0.01039	1.0833

**Tabla 9. Valores promedio para Cinética de Producción de Biomasa.**

Así mismo, los valores de Cinética de Producción de Biomasa, se aplicaron en la ec. 2:

$$\Delta x_v / X_{v,0} \cdot V = a[(S_0 - S_e) / X_{v,0} \cdot t_n] - b$$

Donde  $\Delta x_v / X_{v,0} \cdot V$ , corresponde a la velocidad específica de crecimiento de biomasa, sus unidades son: mg SSVLM producidos / (días) (mg SSVLM), en función a la velocidad de consumo de sustrato y se muestra en la Gráfica: 2. Del análisis de regresión, con  $r = 0.49$  se obtuvieron las constantes biocinéticas para:

Producción de Biomasa (a) = 0.00301 mg SSVLM / mg DQO

Respiración Endógena (b) = 0.0131 día<sup>-1</sup>

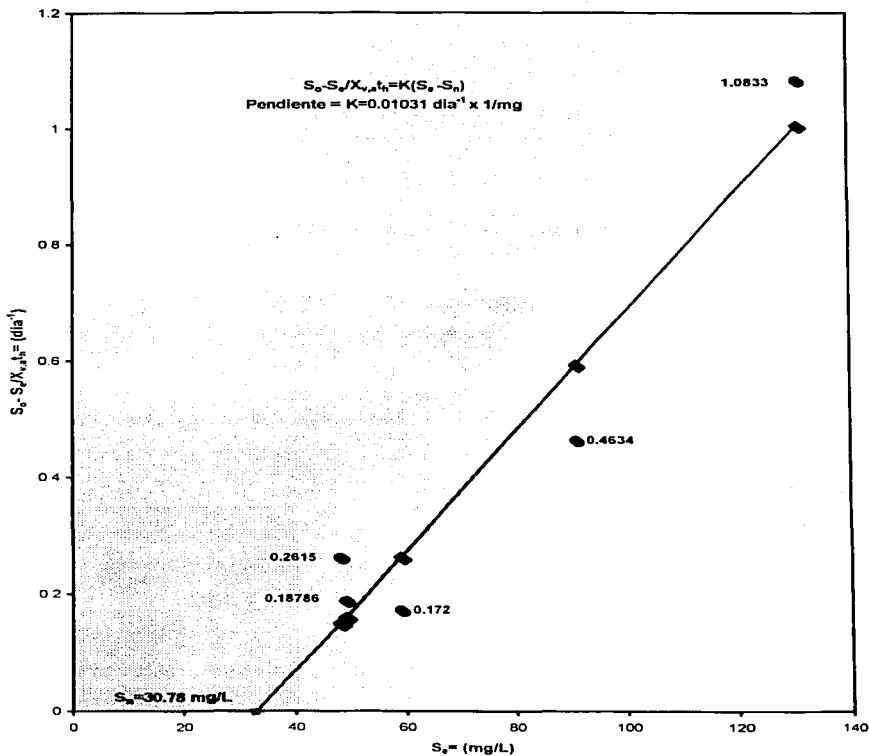
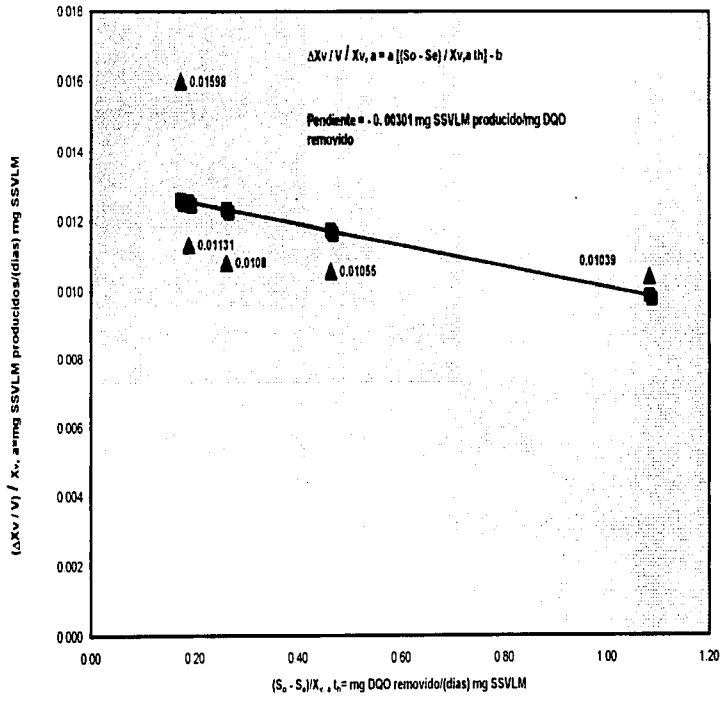


Gráfico No. 1. Cinética para Consumo de Sustrato

48

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN





Gráfica No. 2. Cinética de Producción de Biomasa

En la Tabla: 10, se indican los valores promedio de los parámetros de operación y control del sistema continuo que se obtuvieron durante la experimentación y que correspondieron básicamente a:

- Caudal del influente (Q)
- Concentración del lodo ( $X_v$ )
- Relación alimento- microorganismos (F/M)
- Tiempo medio de contacto entre partícula suspendida y sistema aireado (TMRC,  $t_c$ )
- Características de Sedimentación (SVI)

Por otro lado en la Tabla 10, se muestran los resultados del promedio de remoción para cada reactor de: sólidos suspendidos en el efluente (SSE) y carga orgánica (DQO).

Reactor	Gasto ml/min	Volumen (L)	DQO g/L	SSVLM X <sub>v</sub> Mg/L	S&V Influyente mg/L	SVI ml/gr	T <sub>c</sub> (horas)	F/M (día <sup>-1</sup> )	TMRC (día)	% de Remoción de SSE	% de Remoción de DQO
I	4.9	11.1	309	876	424	100	37.9	0.22	3	51	84
II	6.9	12.37	347	1361	438	61	29.5	0.21	4	51	83
III	9.7	12.37	320	1177	421	257	21.2	0.31	2	32	85
IV	4.9	11.1	559	1144	530	158	37.9	0.31	3	97	83
V	10.4	12.37	554	1211	530	272	19.8	0.55	2	94	84
VI	17.4	12.37	586	848	530	517	11.9	1.39	1	95	78

SSE: Sólidos Suspendidos en el Efluente

**Tabla 10. Valores Promedio para Parámetros de Control, mantenidos durante la Actividad Experimental**

## 4.2 Análisis de Resultados

Se obtuvieron las constantes biocinéticas del análisis de regresión utilizando solamente 10 datos en promedio por reactor, de 15 en total que se obtuvieron durante la fase experimental (ver Anexo II). Los datos que fueron eliminados, correspondieron básicamente a aquellos valores con concentraciones de sustrato muy altos o muy bajos en comparación al resto de valores obtenidos. También éstos valores eliminados tenían porcentos de remoción muy bajos.

Al analizar el valor obtenido de la constante de consumo de sustrato  $K = 0.01031 \text{ día}^{-1}$ , y al compararlo con otras constantes reportadas en la bibliografía <sup>(22)</sup> para aguas residuales de diferentes orígenes, parece indicar que la constante del agua residual estudiada cae dentro del intervalo de la constante para aguas residuales de origen químico y petroquímico, ya que ésta reporta una  $K$  entre  $0.0029$  a  $0.018 \text{ día}^{-1}$ . La acción de comparar los resultados obtenidos con los bibliográficos nos pueden servir como guía para el diseño de una planta de tratamiento. Sin embargo, la información más importante es la que se extrae de los estudios a escala de laboratorio que nos determina la capacidad de consumo de productos orgánicos de un lodo biológicamente aclimatado que recibe una agua residual determinada.

El material no biodegradable,  $S_n = 30.78 \text{ mg/L}$  es un valor característico obtenido del análisis del agua estudiada y constituye el material que permanecerá incluso después de un tiempo infinito de retención en el reactor biológico.

Así mismo, en cuanto a los resultados de los parámetros:  $a = 0.00301 \text{ mg SSVLM/mg DQO}$  y  $b = 0.0131 \text{ día}^{-1}$ , cuyo comportamiento se muestra en la Gráfica 2, no es lo que se esperaba, dado que, la pendiente fue negativa, la producción de biomasa fue inversamente proporcional a la velocidad específica de consumo de sustrato, es decir hubo más pérdida de lodo que producción del mismo. Al tratar de entender estos resultados fue necesario analizar los resultados de los parámetros de operación y control. Básicamente el equilibrio del sistema biológico trabajado

estaba condicionado por la relación alimento-microorganismo (F/M) esto se pudo justificar al variar la carga orgánica en el influente ( $S_0$ ) ya sea por el gasto manejado o por el periodo del año en que se tomaron las muestras, esto es, si era época de lluvia o época de estiaje, la carga orgánica expresada por DQO, fue mayor en la época de estiaje en un 42 %. De tal modo que el aumento o disminución de la concentración de la carga orgánica con respecto a la concentración del lodo y al tiempo de retención hidráulica ( $t_h$ ), consideramos que influyó en el equilibrio del sistema de tratamiento y por tanto, en el no-crecimiento de biomasa.

El tiempo de retención fue un factor importante en la estabilidad del sistema de tratamiento, ya que si se tuvo variación en la carga orgánica del influente, los valores de  $t_h$  todo el tiempo fueron altos (ver Tabla 10) y por lo tanto, al analizar la curva de crecimiento de microorganismos, indicada en el Esquema 2, nos hace determinar que de acuerdo a los  $t_h$  trabajados pudimos estar en fase de respiración endógena ya que no se logró mantener una estabilidad en el crecimiento de biomasa, sin embargo a pesar de tener un decrecimiento de biomasa se obtuvo una remoción de sustrato del 78% al 85% en el efluente.

Analizando el porcentaje de remoción de los sólidos suspendidos totales en el efluente (SSTE), se obtuvieron valores de remoción de hasta 97 %, principalmente para muestras tomadas en periodo de estiaje; cuyos resultados en promedio excedían en un 50 % a las muestras tomadas en época de lluvia. Relacionando los resultados de remoción con las características de sedimentación (SVI) se observó que cuanto mejor remoción de SSTE se obtuvo, mayores eran los SVI (valores  $> 200$  ml/gr) se presentaron con más frecuencia en muestras del periodo de estiaje; también se pudo notar que los efluentes con SVI altos eran los más claros, es decir, que a pesar de que no se contaba con equipo de medición de turbiedad sí se tenían los porcentajes de remoción de SSTE y de DQO, donde era posible determinar que la calidad del agua de este tipo de efluentes era buena, Tabla 10.

Una explicación que se puede dar a lo descrito en el párrafo anterior es que de acuerdo con la experiencia del trabajo con lodos activados ya realizado en el laboratorio<sup>(23)</sup> y lo que reporta la bibliografía<sup>(24)</sup>, es que en los reactores donde se trabajó con alimentación mayor de 6.9 ml/min, se observó el fenómeno "bulking" el cual se manifestó constantemente, provocando engrosamiento del lodo y una sedimentación lenta. En este tipo de lodo formado de organismos filamentosos se forman puentes o floculos difusos y voluminosos que retienen partículas, impidiendo que éstas se compacten y precipiten, dando por resultado que se generen SVI altos. Si bien la presencia de lodo abultado puede estar relacionada a una mala relación alimento/ microorganismo (F/M), el  $t_n$  es un factor determinante de éste tipo de problema ya que ambos parámetros de control mantienen una relación en el sistema que los hace ser dependientes uno del otro.

El tiempo medio de retención celular (TMRC) fue un parámetro de control importante ya que los resultados de éste parámetro nos indicaron el tiempo de permanencia de la concentración del lodo activo en el proceso de tratamiento, en su mayoría fueron tiempos cortos, sin embargo para gastos de alimentación de 4.9 ml/min, tanto en periodo de lluvias y estiaje, como de 6.9 ml/min, se obtuvieron valores ligeramente más altos de TMRC = 3 y 4 días, respectivamente. Esto está definitivamente relacionado con la F/M y  $t_n$ , por consiguiente, es un parámetro de diseño que depende del volumen del reactor, donde se va llevar a cabo el proceso de tratamiento entre el agua residual y la concentración del lodo activo en el tiempo óptimo de contacto.

Por lo que, como se indica en la Tabla 11, de acuerdo a la carga orgánica que tiene el agua residual del IPCM, es conveniente trabajar con concentraciones de lodo activo a un 49% (2158 mg/L) más de lo que se tuvo en promedio, que entonces, para un gasto de 6.9 ml/min, se podría tener una relación de F/M entre 0.3 - 0.6 días, que es lo que reporta la bibliografía<sup>(22, 24)</sup>, y por lo tanto el TMRC aumentaría un poco más de acuerdo a lo calculado: entre 5 y 6 días, lo cual contribuiría a mejorar la relación alimento/ microorganismos que se reflejaría en la eficiencia de la remoción.

Es importante mencionar que el uso del sistema continuo para el estudio cinético, los parámetros manejados, sólo constituyen una parte del conjunto de parámetros que se necesitan para el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales. Un parámetro importante como es la utilización de oxígeno no fue posible determinarse en este trabajo por falta de equipo y material conveniente.

Parámetro Reactor	Volumen (L)	DQO (‰) (mg/L)	Gasto		SSVLM		TRH		F/M		TMRC	
			(ml/min)	(g/g)	(mg/L)	(g/g)	(horas)	(días <sup>-1</sup> )	(días)	(días)		
I	11.1	309	4.9	6.9	876	2158	37.9	10.8	0.22	0.32	3	6
II	12.37	347	6.9	6.9	1361	2158	29.5	10.8	0.21	0.35	4	6
III	12.37	320	9.7	6.9	1177	2158	21.2	10.8	0.31	0.33	2	6
IV	11.1	559	4.9	6.9	1144	2158	37.9	10.8	0.31	0.57	3	5
V	12.37	554	10.4	6.9	1211	2158	19.8	10.8	0.55	0.57	2	5
VI	12.37	586	17.4	6.9	848	2158	11.9	10.8	1.39	0.8	1	5

- Valores calculados  
 Valores obtenidos en el Laboratorio

**Tabla 11. Comparación de Parámetros experimentales y Parámetros calculados de acuerdo a la ecuación de cinética de Consumo de Sustrato.**

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

Existieron aspectos importantes en el tratamiento del agua residual del IPCM al ser sometida a un proceso biológico continuo. Uno de estos aspectos fue el vislumbrar la importancia de los periodos del año para un sistema de tratamiento. Para el caso estudiado la variación entre el periodo de lluvias y el periodo de estiaje fue de un 42% en cuanto a carga orgánica. Otro fue la determinación de los parámetros biocinéticos:  $K$ ,  $S_n$ ,  $a$  y  $b$ , por un sistema biológico continuo, importantes para el diseño de una planta de tratamiento. Así mismo el comportamiento de éstos parámetros nos condujo a analizar la relación que existe entre los parámetros de operación y control como lo fueron:  $Q$ ,  $t_n$ ,  $F/M$ ,  $TMRC$  y  $SVI$  y su importancia en la eficiencia del sistema de tratamiento trabajado.

Las plantas de tratamiento de aguas residuales que operan bajo criterios de diseño, que usan sistemas continuos se espera que produzcan un efluente que se aproxime en gran medida a la calidad esperada. Ello nos lleva a considerar que constantes como la velocidad específica de consumo de sustrato y la de producción de biomasa, que fueron evaluadas en reactores a escala de laboratorio presentaron ciertas dificultades para su obtención, ya que fue difícil mantener el control de las condiciones que las determinaron. Lo que sí se procuró fue mantener una medida de confianza para establecer un cierto equilibrio entre el agua a tratar y el sistema. Es por tanto, necesario e importante determinar y tener bajo control todos los parámetros de diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales del IPCM, con la confianza de que funcionará a la capacidad de diseño y calidad demandada.

Uno de los objetivos de este trabajo fue el de proponer alternativas de operación bajo las cuales se puede trabajar con reactores a escala de laboratorio y así lograr una mayor eficiencia del sistema de tratamiento por todos activados. Por ello las condiciones que nos proporcionaron información para la cual fue posible dar una serie de recomendaciones para el manejo de parámetros de operación y control, fueron las obtenidas en los reactores con gastos de 6.9 ml/min, los cuales nos dieron buenos resultados en cuanto a remoción de contaminantes.

Por lo tanto, las recomendaciones que se pueden dar, de acuerdo a lo que éste trabajo de investigación aportó, son las siguientes:

- a) Trabajar con concentraciones de sólidos suspendidos en el licor mezclado superior a 2000 mg/L.
- b) Manejar tiempos de retención celular mayores a los trabajados.
- c) Aplicar tiempos de retención hidráulico menores, que contribuyan a tener una buena relación alimento-microorganismos.
- d) Es necesario realizar pruebas de oxígeno requerido para oxidar el sustrato y para la respiración endógena.
- e) Conservar un margen de flexibilidad, como un máximo medio y mínimo, en el manejo de los caudales.

En resumen se tiene que el tratamiento de las aguas residuales depende de su composición concentración y flujo; por lo que el objetivo de cualquier tipo de tratamiento siempre estará enfocado a eliminar la mayor cantidad de contaminantes.

Así mismo, por la composición de las aguas residuales del IPCM, el estudio con otros procesos de tratamiento y los procedimientos que deben seguirse, en estudios de diseño sucesivos, nos lleva a establecer, que tanto la carga contaminante como la concentración de todo activo, son variables determinantes de condiciones críticas, medias y óptimas de operación que se deben tomar en cuenta para optimizar el rendimiento del proceso.

Es importante que el diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales del IPCM se realice bajo el criterio de satisfacer las necesidades para las cuales se vaya a destinar, que beneficie a la población tanto en la recuperación de un recurso como en el cuidado del medio ambiente.



## ANEXO I.

### Definición de los Símbolos Utilizados en el Sistema Continuo.

#### **Caudales**

$Q_F$  = Alimentación inicial ml/min.  
 $Q_c$  = Alimentación combinada ml/min.  
 $Q_e$  = Efluente final ml/min.  
 $Q_R$  = Reciclado ml/min.  
 $Q_w$  = Purga ml/min.  
 $Q_u$  = Descarga del clarificador ml/min.

#### **Concentraciones (mg/L) de la DBO o DQO soluble.**

$S_F$  = DBO soluble de la alimentación inicial.  
 $S_o$  = DBO soluble de la alimentación combinada.  
 $S_e$  = DBO soluble del efluente.

#### **Concentraciones (mg/L) de los sólidos suspendidos volátiles (SSV).**

$X_{v,F}$  = SSV en la alimentación inicial.  
 $X_{v,o}$  = SSV en la alimentación combinada.  
 $X_{v,a}$  = SSV en el reactor. Esta concentración es asimismo igual a la de SSV en el efluente del reactor (reactor de mezcla completa en equilibrio).  
 $X_{v,u}$  = SSV en la descarga del clarificador secundario.  
 $X_{v,e}$  = SSV en el efluente final.

#### **Concentraciones (mg/L) de los sólidos suspendidos no volátiles (SSNV).**

$X_{NV,F}$  = SSNV en la alimentación inicial.  
 $X_{NV,o}$  = SSNV en la alimentación combinada.  
 $X_{NV,a}$  = SSNV en el reactor ( $X_{NV,a} = X_{NV,u}$ ). Esta concentración es asimismo igual a la de SSNV en el efluente del reactor (reactor de mezcla completa en equilibrio).  
 $X_{NV,u}$  = SSNV en la descarga del clarificador secundario.  
 $X_{NV,e}$  = SSNV en el efluente final.

#### **Purga.**

$(SSV)_w$  = mg/día de SSV en la purga.  
 $(SSNV)_w$  = mg/día de SSNV en la purga.  
 $(SST)_w$  = mg/día de SST en la purga.

#### **Volumen del Reactor**

$V$  = volumen del reactor, L

#### **Producción de lodos.**

$\Delta x_v$  = mg/día.

ANEXO II. (Tablas A – F de Resultados)

Tiempo (días)	Influyente DBO(mg/L)	Efluente DBO (mg/L)	Influyente DQO (mg/L)	Efluente DQO (mg/L)	% de Remoción	SSVLM (mg/L)	SVI (ml/g)	F/M (días <sup>-1</sup> )	ΔXv (mg/L)	TMRC (días)
1	188	6.80	349	65	81	1975 2075	28	0.114 0.109	- 100	3
2			319	24	92	1670	50	0.124	-	2
3			262	74	72	1710	53	0.199	40	3
4			814	101	88	2050	80	0.25	340	2
5	128 260	7.90 3.04	367	128	65	3085	-	0.077	1035	5
6			253	40	84	-	-	-	-	-
7			285	55	81	3860	-	0.047	775	7
8			329	55	83	2325	180	0.192	-	3
9	373 373	15.3 10.8	259	16	94	2550	196	0.066	225	2
10			455	64	86	-	-	-	-	-
11			312	-	-	2345	102	0.086	-	2
12	183	15.1	449	64	86	2295	80	0.127	-	3
13			333	71	79	2180	91	0.099	-	4
14			194	16	92	2045	122	0.062	-	3
15			237	-	-	1955	95	0.079	-	3

Tabla A: Resultados de parámetros determinados durante el periodo de lluvias. Reactor I. Q = 4.9 ml/min.

Tiempo (días)	Influyente DBO(mg/L)	Efluente DBO (mg/L)	Influyente DQO (mg/L)	Efluente DQO (mg/L)	% de Remoción	SSVLM (mg/L)	SVI (ml/g)	F/M (días <sup>-1</sup> )	$\Delta X_v$ (mg/L)	TMRC (días)
1	188	6.80	349	116	67	2770 3050	50	0.102 0.093	280	3 -
2			319	40	87	2740	51	0.095	-	3
3			262	71	73	2735	53	0.078	-	4
4			814	78	90	2725	54	0.243	-	3
5	128 260	5.59 3.54	367	72	80	3685	-	0.052	960	7
6			253	40	84	3000	-	-	-	-
7			285	120	-	3085	-	0.075	85	4
8			329	55	83	3005	66	0.089	-	3
9	373 373	15.3 7.3	259	31	88	2130	52	0.099	-	1
10			455	56	88	2230	144	0.166	100	3
11			312	-	-	2360	75	0.107	130	1
12	183	9.0	449	32	93	2330	63	0.157	-	2
13			333	56	83	2365	93	0.114	35	3
14			194	-	-	2415	98	0.065	50	2
15			237	16	93	2070	135	0.093	-	3

**Tabla B: Resultados de parámetros determinados durante el periodo de lluvias. Reactor II. Q = 6.9 ml/min.**

Tiempo (días)	Influyente DBO(mg/L)	Efluente. DBO (mg/L)	Influyente. DQO (mg/L)	Efluente DQO (mg/L)	% de Remoción	SSVLM (mg/L)	SVI (ml/g)	F/M (días <sup>-1</sup> )	$\Delta X_v$ (mg/L)	TMRC (días)
1	188	3.72	349	70	80	2875	45	0.076	-	2
2			319	80	75	2880 2900	60	0.075 0.075	5 20	- 2
3			262	32	88	2345	142	0.093	-	2
4			814	93	88	3310	112	0.066	965	2
5	128 260	2.46 9.51	367	32	91	3835	-	0.039	525	3
6			253	63	75	3535	-	-	-	-
7			285	47	84	2840	-	0.1066	-	3
8			329	55	83	3080	266	0.098	240	2
9	373 373	20.7 7.9	259	24	91	2215	235	0.196	-	1
10			455	40	91	2220	423	0.196	5	2
11			312	-	-	2045	430	0.212	-	1
12	183	8.8	449	72	84	2180	282	0.098	135	2
13			333	71	79	2195	341	0.097	15	2
14			194	16	92	2310	312	0.092	115	2
15			237	40	83	1900	463	0.112	-	2

Tabla C: Resultados de parámetros determinados durante el periodo de lluvias. Reactor III.  $Q = 9.7$  ml/min.

Tiempo (días)	Influyente DBO(mg/L)	Efluente DBO (mg/L)	Influyente DQO (mg/L)	Efluente DQO (mg/L)	% de Remoción	SSVLM (mg/L)	SVI (ml/g)	F/M (días <sup>-1</sup> )	ΔX <sub>v</sub> (mg/L)	TMRC (días)
1	492	-	855	522	39	1970	74	0.16	-	3
2			756	358	55	-	81	0.16	-	-
3			827	263	68	2070	76	0.15	100	3
4	233	91	644	634	-	2070	81	0.15	-	2
5			479	131	73	1600	92	0.09	-	2
6	42	-	436	54	88	2215	88	0.07	615	3
7			296	8	97	1825	101	0.01	-	3
8	203	9.07	129	16	88	2255	90	0.01	430	4
9			550	16	97	1965	101	0.06	-	3
10			550	8	98	2065	98	0.06	100	3
11	116	6	578	71	88	1585	97	0.05	-	2
12	319	9	506	-	-	1950	318	0.1	365	2
13			613	24	96	2025	405	0.1	685	3
14	410	17	467	40	92	2045	440	0.1	780	3
15	136	14	-	-	-	2035	-	-	-	4

Tabla D: Resultados de parámetros determinados durante el periodo de estiaje. Reactor IV. Q = 4.9 ml/min.

Tiempo (días)	Influyente DBO(mg/L)	Efluyente DBO (mg/L)	Influyente DQO (mg/L)	Efluyente DQO (mg/L)	% de Remoción	SSVLM (mg/L)	SVI (m/g)	F/M (días <sup>-1</sup> )	$\Delta X_v$ (mg/L)	TMRC (días)
1	492	-	855	412	52	1690	82	0.64	-	1
2			756	342	57	-	103	0.35	-	-
3			827	287	65	1550	86	0.40	-	1
4	233	84	644	416	35	2285	101	0.26	735	1
5			479	85	82	1535	188	0.18	-	1
6	42	-	436	54	88	2565	312	0.11	1030	2
7			296	16	94	1930	155	0.026	-	2
8	203	7.9	129	48	63	2555	297	0.02	625	2
9			550	8	98	1555	244	0.14	-	1
10			550	8	98	1825	307	0.13	270	2
11	116	7.14	578	55	90	1440	639	0.10	-	1
12	319	9	506	71	86	1860	441	0.20	420	1
13			613	24	96	2670	344	0.14	810	2
14	410	25	467	55	88	2130	441	0.18	-	2
15	136	28	-	-	-	2215	-	-	85	2

Tabla E: Resultados de parámetros determinados durante el periodo de estiaje. Reactor V.  $Q = 10.4$  ml/min.

Tiempo (días)	Influyente DBO(mg/L)	Efluyente DBO (mg/L)	Influyente DQO (mg/L)	Efluyente DQO (mg/L)	% de Remoción	SSVLM (mg/L)	SVI (ml/g)	F/M (días <sup>-1</sup> )	$\Delta X_v$ (mg/L)	TMRC (días)
1	492	-	855	301	65	1240	114	0.40	-	0.6
2			756	613	23	-	83	0.80	-	-
3			827	495	40	1270	98	0.78	30	0.5
4	233	112	644	535	17	1715	83	0.58	445	0.4
5			479	124	74	1765	78	0.27	50	1
6	42	-	436	69	84	1325	107	0.36	-	1
7			296	-	-	-	147	0.018	-	-
8	203	3	129	97	23	2110	161	0.04	785	1
9			550	16	97	2075	395	0.20	-	1
10			550	24	96	1925	395	0.21	-	1
11	116	2	578	87	85	1010	811	0.23	-	0.5
12	319	12	506	63	88	690	1304	0.93	-	0.3
13			613	56	91	1315	694	0.49	625	0.5
14	410	29	467	71	85	785	1172	0.82	-	0.4
15	136	41	-	-	-	1655	-	-	-	1

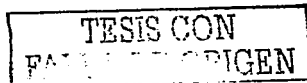
Tabla F: Resultados de parámetros determinados durante el periodo de estiaje. Reactor VI. Q = 17.4 ml/min.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1) ACCISA, et. al., "*Tratamiento de Aguas Residuales Industriales y sus Soluciones*"
- 2) APHA, AWWA y WPCF., "*Standard Methods: For The Examination Of Water And Wastewater*", 16th Ed. E. U. A., 1985, pp. 127-133 y 525-533.
- 3) Arciaga, P.J.L., "*Evaluación del Proceso de la Planta Tratadora de Aguas Residuales Cd. Deportiva*". Tesis: Ing. Quim. , FES-C UNAM, 1987.
- 4) Atkinson, B. "*Reactores Bioquímicos*", Reverte, España, 1986, pp. 3-13.
- 5) Badillo, S.L., "*Consideraciones para el Estudio Económico de Procesos Aeróbicos, empleados en el Tratamiento de Aguas Residuales*", Tesis: Q.F.B, FES-C UNAM, 1993.
- 6) Bailey, J. E. And Ollis, D. F. "*Biochemical Engineering Fundamentals*", Mc-Graw Hill, Kogakusha LFD, 1977, p. 706.
- 7) Brown, C.M; Campbell, I. And Priest, F.G., "*Introducción a la Biotecnología*", Acribia, España, 1989.
- 8) Comisión Nacional del Agua, "*Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales a Diciembre del 2000*"  
<http://www.cna.gob.mx/portal/pública/estaticas/inventariopt.htm>.
- 9) Crueger, Wolf y Crueger, Anneliese., "*Biotecnología: Manual de Microbiología Industrial*", Acribia, España, 1989, pp. 365-369.
- 10) "*Curso sobre Agua: Tratamiento y Reutilización en la Industria*", Fundación Mexicana para la Educación Ambiental A. C., Tepetzotlan Edo. Mex., 1992.
- 11) Eckenfelder W. W. Jr., "*Water Quality Engineering For Practicing Engineers*", Barnes and Noble INC., New York, 1990, pp. 20-27.



- 12) Fair, M.G. y Geyer, CH. J., "Purificación de Aguas y Remoción de Aguas Residuales", Limusa, México, 12ª ed., 1996, pp. 531-540.
- 13) Geyer, F. And Okun, "Ingeniería Sanitaria de las Aguas Residuales", Limusa, 1979, p. 53.
- 14) Guyot, J.P.; Monroy, O y Noyola, A., "Tratamiento Anaerobio Desarrollado en México por investigadores de la UAM-1, el ORSTOM y la UNAM", Corporación Franco Mexicana, 19-21(1992).
- 15) Hawker, L. E. et. al., "Elementos de Microbiología General", Acribia, España, 1964, pp. 205-220.
- 16) Lehr, J. H. et. al., "Domestic Water Treatment", Mc-Graw Hill, Book Company, E. U. A., 1980, p. 93.
- 17) "Manual de Tratamiento de Aguas", Dpto. de Salinidad del estado de Nueva York, 1976, pp. 25-40.
- 18) McKenzie, L. D. And Cornwell, D. A., "Introduction To Environmental Engineering", 2ª Ed., Mc-Graw Hill, International Editions, 1991, pp. 261-401.
- 19) McKinney, R. E., "Wastewater Treatment Municipal", Encyclopedia of Microbiology, Academic Press, vol. 4, 1992, pp. 363-374.
- 20) Metcalf-Eddy, "Tratamiento y Depuración de las Aguas Residuales", Limusa, España, 1981.
- 21) Osorio, R. R., "Caracterización Fisicoquímica de las Aguas Residuales del Interceptor Poniente", Tesis: Ing. Quím. FES-C UNAM, 1995.
- 22) Ramalho, R. S., "Introduction The Wastewater Treatment Process", Academic Press, New York, 1977, pp. 157-197.
- 23) Ramírez, E. A. y Márquez F. P., "Tratamiento del Agua Residual del Interceptor Poniente de la Ciudad de México Bajo los Sistemas SBR y Continuo por el Proceso de Lodos Activados", Tesis: Ing. Quím., FES-C UNAM, 1994.
- 24) Reclievre, E. B. And Shuartz, M., "The Treatment Of Industrial Wastes", 2th Ed. International Student Edition, Mc-Graw Hill, Kogakusha LTD, 1976, pp. 33-37.
- 25) Rheineheime, G., "Microbiología de las Aguas", 4ª ed. Acribia, España, 1987, pp. 163-185.



- 26) Richard, D., *"Activated Slud Microbiology"*, The Water Pollution Control Federation, Alexandria Virginia, 1989, p. 32.
- 27) Rittmann, B. E., *"Aerobic Biological Treatment"*, Trabajo presentado en US Army Corps of Engineers Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, 1(11), 565-577, (1984).
- 28) Rodríguez, P. E. y Nolan, E. C., *"Algunos Aspectos Económicos, Sobre el Tratamiento de las Aguas residuales"*, Agua Potable, 2ª parte, (1990).
- 29) Salameh, M. F. And Mallina, J. F., *"The Effects Of Sludge Age and Selector Configuration On the Control Filamentous Bulking in the Activated Sludge Process"*, Journal WPCF, 61(9), 1510-1522.
- 30) Saylor, Gary, S. et. al., *"Predictive Assessment of Priority Pollutant Bio-oxidation Kinetics in Activated Sludge"*, Environmental Progress, August, 3(3), 153-162 (1984).
- 31) *"Simplified Laboratory Procedures For Wastewater Examination"*, 3th Ed. Water pollution Control Federation, 1985, p. 28.
- 32) Walker, J. M. And Gingold, E. B., *"Biología Molecular y Biotecnología"* Acribia, España, 1988, pp. 2-5.
- 33) Weisman, Alan, *"Principios de Biotecnología"*, Acribia, España, 1986, pp. 6-10.
- 34) Wesley, O.Pipes, *"Bulking, Defoccculation and Pinpointfloc"*, Journal WPCF, January 51(1), 62-70(1979).
- 35) Winkler, Michael, *"Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho"*, Limusa, México, 1986, pp. 105-120.

TESIS CON  
 FALLA DE ORIGEN