

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA

DIRECCIÓN ACADÉMICA DE RECURSOS NATURALES

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE
UN TRATAMIENTO BIOLÓGICO AEROBIO,
EN LAS AGUAS RESIDUALES DEL ITSON,
UNIDAD NÁINARI**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRA EN CIENCIAS EN
RECURSOS NATURALES**

PRESENTA

MA. ARACELI CORREA MURRIETA

CD. OBREGÓN, SON., MÉXICO

NOVIEMBRE DE 2003

DEDICATORIAS

A **Pedro** por su comprensión, paciencia y aliento.

A **mis amores: Juan Pedro**, por continuar siendo el ángel que inspira mi vida y **Fernando**, por entenderme y alegrarme cuando más lo necesito.

A mis ángeles: **Bertha, Víctor y Cruz**, por ser el ejemplo a seguir de fortaleza y aceptación divina.

A mi **familia**: hermanas (os), cuñadas (os), sobrinas (os), suegros, por apoyarme siempre en los momentos más importantes de mi vida.

A mis **amigos**, por estar conmigo en las buenas y en las malas.

A mis **compañeros de maestría**: Reyna, René, Juan Carlos, Alma, Cinthya y Gabriel, por su amistad y haber hecho este periodo escolar más provechoso y divertido.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, por permitirme alcanzar esta meta y no abandonarme, dándome fortaleza cuando más lo necesito.

Al *ITSON*, por continuar siendo una institución ejemplar.

A mi asesora, M. en C. María Guadalupe Aguilar Apodaca, por el apoyo incondicional a la realización de esta tesis.

Al *M. en C. Pablo Gortares Moroyoqui, Dr. Francisco Javier Cervantes Carrillo, M. en C. Francisco Enrique Montaña Salas y M. en C. Jorge Saldívar Cabrales*, por sus aportaciones y recomendaciones a este trabajo.

Al personal del laboratorio de Agua, Suelo y Planta, especialmente al *M. en C. Raúl Holguín S. y al Q. Rafael Angulo I.*, por su indispensable asesoría y apoyo en los análisis realizados.

A mis *maestros*, por compartir sus conocimientos y experiencias.

RESUMEN

El ITSON está interesado en implementar un sistema de tratamiento de las aguas residuales generadas en la unidad Náinari, por lo que el presente trabajo forma parte del proyecto de investigación: “Caracterización de las aguas residuales generadas en la unidad Náinari del Instituto Tecnológico de Sonora y alternativas de tratamiento”. El estudio consiste en tres etapas: caracterización fisicoquímica y biológica, pruebas de tratabilidad y diseño de la planta de tratamiento. Ubicándose esta investigación dentro de las pruebas de tratabilidad, específicamente para un tratamiento biológico aerobio; siendo este un proceso natural, donde las bacterias, principalmente, son las encargadas de degradar la materia orgánica presente como contaminante, evitando con ello utilizar químicos que alteren el ambiente.

El objetivo de este trabajo consistió en evaluar si el tratamiento biológico aerobio es capaz de eliminar cuando menos un 70% de materia orgánica, de las aguas residuales del ITSON, unidad Náinari, para ser considerado como una alternativa para el diseño de la planta.

Las pruebas de tratabilidad se realizaron en el laboratorio de “Agua, Suelo y Planta” y en el de “Suelos”, pertenecientes a la Dirección de Recursos Naturales, del ITSON, durante el periodo comprendido de febrero del 2002 a marzo del 2003; efectuándose nueve experimentos en periodos representativos en los ciclos académicos de la institución. La metodología empleada fue en base a lo recomendado por Eckenfelder (1966), trabajándose con 3 reactores en cultivo por lote.

A partir de los resultados obtenidos se concluye que el agua residual del ITSON, unidad Náinari, es biodegradable y que la materia orgánica del agua residual, expresada como DQO y DBO soluble, se degradó en más del 70%.

También se obtuvieron las constantes cinéticas de biodegradación, las cuales variaron dependiendo del ciclo escolar estudiado, siendo el valor mínimo de 0.55 d^{-1} ($R^2 = 0.99$) y el máximo de 3.65 d^{-1} ($R^2 = 0.94$). Estas variaciones se debieron a las diferentes características de las aguas residuales, a la adaptación de los microorganismos a ellas y al aumento de la biomasa activa.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	i
ÍNDICE	ii
ÍNDICE DE CUADROS Y TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
I. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	4
1.3 Justificación	5
1.4 Objetivo	5
1.5 Hipótesis	6
II. Fundamentación	7
2.1 Aguas residuales	7
2.1.1 Características	8
2.1.1.1 Físicas	8
2.1.1.2 Químicas	8
2.1.1.3 Biológicas	9
2.1.2 Clasificación.....	9
2.2 Tratamiento de aguas residuales	9
2.2.1 Pretratamiento	10
2.2.2 Tratamiento primario	10
2.2.3 Tratamiento secundario	11
2.2.4 Tratamiento terciario	11
2.3 Procesos biológicos	11
2.3.1 Microbiología del proceso	12
2.3.2 Necesidades nutritivas	13
2.3.3 Crecimiento bacteriano	13
2.3.4 Cinética del crecimiento celular	14

	Página
2.3.5 Clasificación	15
2.4 Proceso biológico aerobio	16
2.4.1 Descripción	17
2.4.2 Cinética de eliminación de substrato	18
2.4.3 Efecto de la temperatura.....	19
2.4.4 Eficiencia del proceso	19
2.4.5 Comparación del tratamiento aerobio con el anaerobio..	20
2.5 Pruebas de tratabilidad	21
2.5.1 Método de Eckenfelder	22
2.5.2 Aplicaciones del método de Eckenfelder	25
III. Método	26
3.1 Ubicación del experimento	26
3.2 Muestreo	26
3.3 Equipo y material	28
3.4 Inóculo	29
3.4.1 Aclimatación de los lodos	29
3.5 Operación del sistema	30
3.5.1 Etapa inicial	30
3.5.2 Operación	30
3.6 Determinación de los parámetros involucrados	31
3.7 Eficiencia del proceso	31
3.8 Determinación de la constante cinética de biodegradación	32
3.9 Criterios estadísticos para la decisión de los análisis de regresión lineal.....	33
IV. Resultados y discusión	34
4.1 Comportamiento de los parámetros	34
4.1.1 Temperatura	34
4.1.2 pH	36
4.1.3 Oxígeno disuelto	36

	Página
4.1.4 Sólidos suspendidos volátiles	36
4.2 Medida de la materia orgánica y eficiencia	37
4.2.1 Semestre enero-mayo 2002	37
4.2.2 Verano 2002	38
4.2.2.1 Primera corrida	38
4.2.2.2 Segunda corrida	39
4.2.3 Semestre agosto-diciembre 2002	40
4.2.3.1 Primera corrida	40
4.2.3.2 Segunda corrida	41
4.2.3.3 Tercera corrida	42
4.2.3.4 Cuarta corrida	43
4.2.4 Semestre enero-mayo 2003	44
4.2.4.1 Primera corrida	44
4.2.4.2 Segunda corrida	45
4.3 Determinación de constantes cinéticas	46
4.3.1 Cálculo de las constantes cinéticas	46
4.3.1.1 Semestre enero-mayo 2002	46
4.3.1.2 Verano 2002	47
4.3.1.3 Semestre agosto-diciembre 2002	48
4.3.1.4 Semestre enero-mayo 2003	49
4.3.2 Resumen de las constantes cinéticas obtenidas	49
V. Conclusiones	51
Bibliografía	53

ÍNDICE DE CUADROS Y TABLAS

TABLA		Página
1	Sistemas biológicos de tratamiento	16
2	Grado de tratamiento obtenido mediante diversas operaciones y procesos unitarios empleados en el tratamiento primario y secundario del agua residual	20
3	Tratamiento aerobio versus tratamiento anaerobio	21
4	Calendarización de muestreos y de pruebas de tratabilidad	27
5	Criterios de decisión para los análisis estadísticos.....	33

CUADRO		
1	Promedio de los parámetros obtenidos durante los tratamientos	35
2	Resumen de los valores de las constantes cinéticas obtenidas	50

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA		Página
1	Curva característica de crecimiento bacteriano en términos del registro de los organismos	14
2	Reactor en cultivo en lote	23
3	Curvas típicas de la concentración de sustrato soluble y de los SSVLM en un reactor discontinuo	24
4	Toma de muestra del agua residual	27
5	Variación de la población de alumnos en el semestre enero-mayo de 2002 (Datos proporcionados por el Departamento de Registro Escolar del ITSON, 2002)	28
6	Reactores utilizados en las prueba de tratabilidad	29
7	Ensayo de la reacción de primer orden	32
8	Curvas del tratamiento para cada uno de los reactores, realizado del 9 al 15 de mayo 2002: a) degradación de materia orgánica y b) eficiencia.	38
9	Curvas del tratamiento para cada uno de los reactores, realizado del 10 al 12 de junio 2002: a) degradación de materia orgánica y b) eficiencia	39
10	Curvas del tratamiento para cada uno de los reactores, realizada del 19 al 24 de junio 2002: a) degradación de materia orgánica y b) eficiencia	40
11	Curvas del tratamiento para cada uno de los reactores, realizada del 29 al 30 de agosto de 2002: a) degradación de materia orgánica y b) eficiencia	41
12	Curvas del tratamiento para cada uno de los reactores, realizada del 3 al 4 de septiembre de 2002: a) degradación de materia orgánica y b) eficiencia	42

FIGURA	Página
13	Curvas del tratamiento para cada uno de los reactores, realizada del 27 al 28 de septiembre de 2002: a) degradación de materia orgánica y b) eficiencia 43
14	Curvas del tratamiento para cada uno de los reactores, realizada del 7 al 8 de noviembre de 2002: a) degradación de materia orgánica y b) eficiencia 44
15	Curvas del tratamiento para cada uno de los reactores, realizada del 18 al 19 de febrero de 2003: a) degradación de materia orgánica y b) eficiencia 45
16	Curvas del tratamiento para cada uno de los reactores, realizada del 18 al 19 de marzo de 2003: a) degradación de materia orgánica y b) eficiencia 46
17	Constantes cinéticas en términos de DQO, correspondiente al periodo del 9 al 15 de mayo de 2002 47
18	Constantes cinéticas en términos de DQO, correspondiente al verano del 2002: a) 10 al 12 de junio, b) 19 al 24 de junio 47
19	Constantes cinéticas en términos de DQO, correspondiente al semestre agosto-diciembre 2002: a) 29 al 30 de agosto, b) 3 al 4 de septiembre, c) 27 al 28 septiembre, d) 7 al 8 de noviembre 48
20	Constantes cinéticas en términos de DQO, correspondiente al semestre enero-mayo 2003: a) 18 al 19 de febrero, b) 18 al 19 de marzo 49

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El agua es uno de los elementos más importantes de la naturaleza, debido a que es imprescindible para mantener el equilibrio de todos los ecosistemas (CNA, 2001). A pesar de que aproximadamente el 71% de la superficie de nuestro planeta está cubierta por mares y océanos, la cantidad de agua disponible es limitada, ya que no puede utilizarse el agua salada (Enkerlin et al, 1997).

Entre la demanda creciente de agua dulce por una parte, y los suministros de agua limitados y cada vez más contaminados por otra, muchos países en desarrollo enfrentan decisiones difíciles. El número de habitantes continúa aumentando rápidamente, pero la tierra no tiene ahora más agua que 2000 años atrás, cuando estaba habitada por menos

del 3% de la población actual. La demanda creciente de agua para la agricultura de regadío, el consumo doméstico (municipal) y la industria está imponiendo una dura competencia por la adjudicación de escasos recursos hídricos a las diversas zonas y tipos de uso. Hoy en día 31 países, habitados por menos del 8% de la población mundial, se ven frente a déficit crónicos de agua dulce. Pero para el año 2025 se prevé que 48 países enfrentarán este déficit, que afectarán a más de 2800 millones de habitantes: 35% de la población mundial proyectada. Además, en gran parte del mundo, el agua contaminada, la evacuación inadecuada de desechos y la deficiente ordenación de las aguas causan serios problemas de salud pública. El uso excesivo y la contaminación de los suministros de agua también están infligiendo serios daños al medio ambiente natural y presentan crecientes riesgos a numerosas especies biológicas (http://www.jhuccp.org/pr/prs/sm14_edsun.shtml, recuperado 12 de febrero 2003).

En México, la distribución de los recursos hidráulicos y las actividades que a partir de ellos se realizan no guardan una relación directa. Se sabe que el 56% del territorio comprende zonas áridas, semiáridas o muy áridas; además, la actividad económica y las mayores tasas de crecimiento se concentran en el norte y centro del país donde la disponibilidad de agua es menor, lo que ha conducido a la sobreexplotación de acuíferos. A estos últimos también se añade el problema de contaminación, principalmente por intrusión salina y migración de agua fósil de mala calidad, así como por la contaminación generada en las ciudades y zonas agrícolas. Los mayores problemas de intrusión salina se presentan en 17 acuíferos costeros, dentro de los más afectados se encuentran Guaymas y la costa de Hermosillo, en Sonora (CNA, 2001).

La contaminación de la mayoría de los cuerpos de agua superficiales (provocada por la descarga de aguas residuales sin tratamiento) ocasiona grados variables de daños y limita el uso directo del agua. A pesar de los avances en el tratamiento de las aguas residuales, a nivel nacional, el 24% de los cuerpos de agua están contaminados, lo que impide su utilización directa en prácticamente cualquier actividad (CNA, 2001).

Esta situación se presenta a pesar de que México cuenta con normas que regulan la calidad de las descargas de aguas residuales (NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-002-

SEMARNAT-1996). Los responsables de focos emisores deben acatar dicha normatividad.

El Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON), consciente de esta problemática, está interesado en implementar un sistema de tratamiento de aguas residuales, en la unidad Náinari, por lo que el presente trabajo forma parte del proyecto de investigación: "Caracterización de las aguas residuales generadas en la unidad Náinari del Instituto Tecnológico de Sonora y alternativas de tratamiento". El estudio se lleva a cabo en tres etapas: caracterización fisicoquímica y biológica, pruebas de tratabilidad y diseño de la planta de tratamiento. Ubicándose esta investigación dentro de las pruebas de tratabilidad, específicamente para un tratamiento biológico aerobio.

La eliminación de los contaminantes de un agua residual se puede lograr con diferentes métodos de tratamiento, como lo son el tratamiento primario, secundario y terciario. El tratamiento primario contempla el uso de operaciones físicas, tales como la sedimentación y el desbaste para la eliminación de los sólidos sedimentables y flotantes presentes en el agua residual. En el tratamiento secundario son procesos biológicos y químicos que se emplean para eliminar la mayor parte de la materia orgánica. En el tratamiento terciario se emplean combinaciones de procesos para eliminar los componentes que no se eliminaron en el tratamiento secundario (Metcalf y Eddy, 1996).

El tratamiento biológico se basa en el proceso en el que una población mixta de microorganismos utiliza como nutrientes sustancias que contaminan el agua. Este es el mecanismo por el cual las corrientes de aguas naturales, como los lagos y los ríos, se autopurifican (Winkler, 2000).

Existen cinco grupos principales de procesos de tratamiento biológico: aerobios, anaerobios, anóxicos, procesos de lagunaje y combinación de procesos aerobios, anaerobios y anóxicos. Estos se pueden dividir, a su vez, dependiendo si el tratamiento se lleva a cabo en sistemas de cultivo en suspensión, en sistemas de cultivo fijo, o en sistemas resultantes de la combinación de ambos (Metcalf y Eddy, 1996).

Para implementar una planta de tratamiento de aguas residuales es necesario, previamente, caracterizar dichas aguas y realizarles pruebas de tratabilidad. Estas tienen el objetivo de determinar si el agua residual es susceptible de ser tratada mediante un sistema determinado, por lo que a partir de los resultados arrojados, se pueden descartar procesos que no se adapten al tipo de agua residual y además, determinar parámetros para el correcto dimensionamiento y operación de la planta. Estas pruebas se llevan a cabo a nivel laboratorio (Fair, 1999). Los ensayos a nivel laboratorio para determinar si las aguas residuales pueden ser degradadas mediante un sistema de tratamiento biológico aerobio y conocer la cinética de la reacción, se basan en el método de Eckenfelder (1966), quien establece que los estudios se pueden realizar en sistemas discontinuos o continuos.

1.2 Planteamiento del problema

México cuenta con normas que regulan la calidad de las descargas de aguas residuales (NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-002-SEMARNAT-1996), desafortunadamente éstas no son debidamente acatadas por la mayoría de los responsables de las fuentes de contaminación.

El ITSON, consciente de esta problemática, está interesado en establecer una planta de tratamiento de aguas residuales, en la unidad Náinari, siendo necesario realizar pruebas de tratabilidad para encontrar la mejor opción de diseño.

Dentro del tratamiento secundario se tiene al biológico aerobio, como una buena opción, por ser un proceso natural que no libera gases malolientes, logra buena eliminación de materia orgánica en poco tiempo y puede ser parte de un tren de tratamiento.

En base a lo anterior, surge la siguiente pregunta:

¿La eficiencia de eliminación de materia orgánica, del tratamiento biológico aerobio para las aguas residuales del ITSON, unidad Náinari, podrá ser superior al 70%?

1.3 Justificación

Ante la escasez y problemas de contaminación del agua, en la actualidad se hace necesario implementar las plantas de tratamiento de aguas residuales. Con ello se pretenden evitar los daños ocasionados a los cuerpos receptores (lagos, ríos, mares, etc.), ya que producen graves desequilibrios ecológicos; además, con un tratamiento eficiente, es posible darle un reuso adecuado al agua procesada.

El ITSON, unidad Náinari, con una población estudiantil de aproximadamente 9,000 alumnos (dato proporcionado por Dirección de Planeación del ITSON, 2002) y con las instalaciones propias de una universidad, genera 100 m³/día de aguas residuales (citado por Sánchez, 2003, tesis en proceso). Estas son vertidas al alcantarillado municipal sin recibir ningún tratamiento, por lo que se puede infringir la norma ecológica que la regula (NOM-002-SEMARNAT-1996) y por lo tanto, verse en la necesidad de pagar derechos por descargas de aguas residuales (CNA,2003).

Una planta de tratamiento permitirá controlar la calidad del agua descargada, cumplir con la normatividad y fomentar en el alumno el espíritu de protección del ambiente (contribuyendo con ello a uno de los objetivos del nuevo plan de estudios); además, el ITSON actualmente está buscando su certificación en las diferentes áreas que lo conforman, por lo que esta medida ayudará grandemente a lograrlo.

Es importante señalar, además, que el tratamiento biológico aerobio no genera olores desagradables, lo cual es una ventaja porque la unidad Náinari del ITSON está ubicada dentro de una zona residencial.

1.4 Objetivo

Evaluar si el tratamiento biológico aerobio es capaz de eliminar cuando menos un 70% de

materia orgánica, de las aguas residuales del ITSON, unidad Náinari, para ser considerado como una alternativa para el diseño de la planta.

1.5 Hipótesis

Las aguas residuales del ITSON, unidad Náinari, pueden ser degradadas al menos en un 70%, mediante un tratamiento biológico aerobio.

II. FUNDAMENTACIÓN

2.1 Aguas residuales

Se sabe que todas las comunidades generan residuos sólidos y líquidos; el agua residual corresponde a la fase líquida y es esencialmente la que se desprende de la comunidad una vez que ha sido contaminada durante los diferentes usos para los cuales fue empleada. Desde el punto de vista de las fuentes de generación, Metcalf y Eddy (1996), definen el agua residual como la combinación de los residuos líquidos, o aguas portadoras de residuos, procedentes tanto de residencias como de instituciones públicas y establecimientos industriales y comerciales, a las que pueden agregarse eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales.

2.1.1 Características

El conocimiento de la naturaleza del agua residual es necesario para determinar su manejo, tratamiento y disposición final (Henze et al, 1997), por lo que a continuación se describen sus principales características.

2.1.1.1 Físicas

Según Metcalf y Eddy (1996), las características físicas más importantes del agua residual son el contenido total de sólidos, término que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta. Otras características importantes son el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad. Dentro de la materia en suspensión, se miden los sólidos suspendidos volátiles (SSV), que representa la materia orgánica que se oxidará y volatizará a 550 ± 50 °C.

2.1.1.2 Químicas

A continuación se describen las principales propiedades químicas, basándose en lo citado por Metcalf y Eddy (1996),

a) Materia orgánica

El 75% de los sólidos en suspensión y el 40% de los sólidos filtrables de un agua residual de concentración media son de naturaleza orgánica.

En esta clasificación se tiene a las proteínas, hidratos de carbono, grasas y aceites, agentes tensoactivos, compuestos orgánicos volátiles (COVs), como el cloruro de vinilo, plaguicidas y productos químicos de uso agrícola.

Medida de la materia orgánica

Para medir el contenido de materia orgánica se tienen dos grupos de métodos:

- Los empleados para medir altas concentraciones de contenido orgánico, mayores de 1 mg/l, tales como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y el carbono orgánico total (COT).

- Los utilizados para determinar concentraciones a nivel traza, como la presencia de plaguicidas.

b) Materia inorgánica

Las concentraciones de las sustancias inorgánicas en el agua aumentan tanto por el contacto del agua con las diferentes formaciones geológicas, como por las aguas residuales que a ella se descargan. Dentro de estas propiedades se tiene el pH, cloruros, alcalinidad, nitrógeno, fósforo, azufre, metales pesados, etc.

c) Gases

Los gases que con mayor frecuencia se encuentran en aguas residuales brutas son el nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2), dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), amoníaco (NH_3) y el metano (CH_4)

2.1.1.3 Biológicas

Estas características se refieren a los organismos presentes en el agua residual. Dentro de ellos se encuentran: bacterias, hongos, algas, protozoos, plantas, animales y virus.

2.1.2 Clasificación

Según su procedencia, las aguas residuales se clasifican en agrícola-ganaderas, domésticas o urbanas, pluviales e industriales (ITSEMAP AMBIENTAL, 1994).

2.2 Tratamiento de aguas residuales

La mayoría de los vertidos de aguas residuales que se hacen en el mundo no son tratados. Simplemente se descargan en el río, mar o lago más cercano y se deja que los sistemas naturales, con mayor o menor eficacia y riesgo, degraden los desechos de forma

natural. En los países desarrollados una proporción, cada vez mayor, de los vertidos es tratada antes de que lleguen a los ríos o mares en estaciones depuradoras de aguas residuales (Horan, 1990).

Las aguas residuales se pueden someter a diferentes niveles de tratamiento, dependiendo del grado de purificación que se quiera. A continuación se describen diferentes sistemas de tratamiento.

2.2.1 Pretratamiento

El agua residual contiene por lo general sólidos en suspensión de diferente tamaño, por lo que Tchobanoglous et al 2000, cita que los objetivos del tratamiento preliminar o pretratamiento son:

- Acondicionar el agua residual para ser tratada en las siguientes etapas de proceso de tratamiento.
- Eliminar materiales que pueden interferir con los equipos y procesos de tratamiento de aguas abajo.
- Reducir la acumulación de materiales en los procesos ubicados aguas abajo del tratamiento preliminar.

2.2.2 Tratamiento primario

Los tratamientos primarios tienen como propósito retirar sólidos suspendidos que lograron pasar el pretratamiento para evitar su interferencia en el tratamiento secundario. Se utilizan clarificadores, sedimentadores, etc. (WEF y ASCE, 1992). Si hay coloides, en ocasiones hay que desestabilizarlos mediante adición de coagulantes y floculantes (Unda, 1999).

2.2.3 Tratamiento secundario

Son procesos biológicos y químicos que se emplean para eliminar la mayor parte de la materia orgánica (Metcalf y Eddy, 1996).

2.2.4 Tratamiento terciario

El tratamiento terciario tiene por objeto acondicionar el agua para su uso final. Dentro de este se encuentran tratamientos físicos como la radiación ultravioleta, adsorción en carbón activado, microfiltración, ultrafiltración, ósmosis inversa; químicos como la cloración, ozonización, peróxido de hidrógeno; y los biológicos, que mediante plantas acuáticas vasculares o flotantes, eliminan tanto componentes inorgánicos como componentes orgánicos (Droste, 1997).

2.3 Procesos biológicos

El tratamiento biológico de las aguas residuales se basa en el proceso aparentemente simple en el que una población mixta de microorganismos utiliza como nutrientes sustancias que contaminan el agua. Este es el mecanismo por el cual las corrientes de aguas naturales, como los lagos y los ríos se autopurifican (Winkler, 2000).

Los objetivos del tratamiento biológico del agua residual son la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica. En el caso del agua residual urbana, el principal objetivo es la reducción de la materia orgánica presente y, en muchos casos, la eliminación de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo (Metcalf y Eddy, 1996).

2.3.1 Microbiología del proceso

Según Metcalf y Eddy (1996), la eliminación de la DBO carbonosa, la coagulación de los sólidos coloidales no sedimentables, y la estabilización de la materia orgánica, se consiguen, biológicamente, gracias a la acción de una variedad de microorganismos: bacterias, hongos, protozoos y rotíferos, y algas.

- a) Bacterias. Son los microorganismos más importantes en el tratamiento biológico. Las condiciones ambientales de temperatura y de pH tienen un papel importante en su supervivencia y crecimiento. Según el intervalo de temperatura en el que el desarrollo bacteriano es óptimo, se les clasifica en psicrófilas (-10 a 30 °C), mesófilas (20-50°C) y termófilas (35-75°C). En cuanto al pH, la mayoría de las bacterias no toleran pH menores de 4.0 ni superiores a 9.5. El pH óptimo para el crecimiento bacteriano se sitúa entre 6.5 a 7.5.
- b) Hongos. La mayoría son aerobios estrictos. El pH óptimo es de 5.6, y el intervalo de tolerancia se sitúa entre 2 y 9. Tienen baja demanda de nitrógeno, ocupan la mitad que las bacterias. Debido a estas características, son de gran importancia en el tratamiento de aguas de origen industrial.
- c) Protozoos y rotíferos. La mayoría de los protozoos son heterótrofos aerobios unicelulares, que se alimentan de bacterias y de materia orgánica, actuando como purificadores de los efluentes de procesos biológicos de aguas residuales. El rotífero es un animal aerobio, heterótrofo y multicelular, muy eficaz en la eliminación de bacterias dispersas y floculadas, así como de pequeñas partículas de materia orgánica, por lo que su presencia en un efluente indica un proceso aerobio de purificación biológica muy eficiente.
- d) Algas. Son protistas unicelulares o multicelulares, autótrofos y fotosintéticos. En las lagunas de estabilización, contribuyen al mantenimiento de la ecología del ambiente acuático, debido al oxígeno que producen; en las lagunas de oxidación aerobia o facultativa, proporcionan el oxígeno a las bacterias heterótrofas aerobias.

2.3.2 Necesidades nutritivas

Para poder reproducirse y funcionar de manera correcta, un organismo necesita:

- Una fuente de energía. Se obtiene de la luz o de las reacciones químicas de oxidación.
- Carbono para la síntesis de materia celular nueva. La materia orgánica y el dióxido de carbono son dos de las principales fuentes de carbono celular para los microorganismos.
- Elementos inorgánicos (nutrientes), tales como nitrógeno, fósforo, azufre, potasio, calcio y magnesio. Los nutrientes orgánicos también pueden ser necesarios para la síntesis celular.

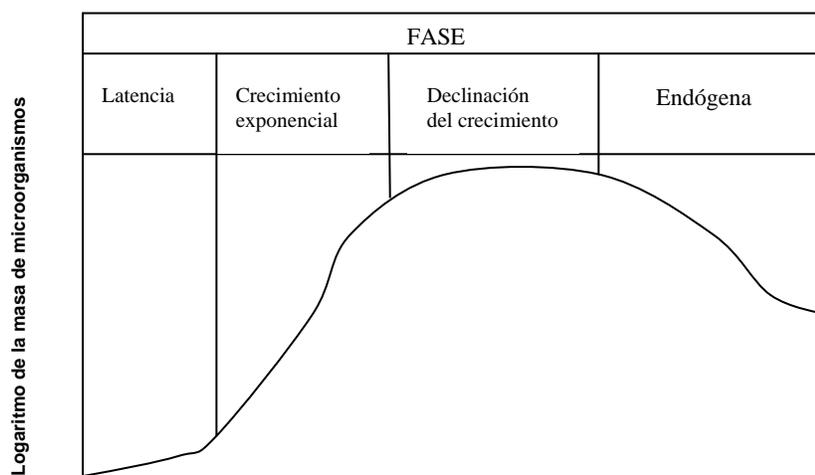
Las aguas residuales municipales (urbanas) suelen contener cantidades de nutrientes (tanto orgánicos como inorgánicos) adecuados para permitir el tratamiento biológico para la eliminación de la DBO carbonosa (Metcalf y Eddy 1996).

2.3.3 Crecimiento bacteriano

Tchobanoglous et al (2000) y Metcalf y Eddy (1996), establecen que las bacterias se reproducen por fisión binaria, de manera sexual o por gemación. En general lo hacen por fisión binaria; la célula original se convierte en dos organismos nuevos. En la figura 1 se muestra el crecimiento en términos de masa bacteriana para un cultivo puro y a continuación se hace su descripción:

1. *La fase de latencia.* Se inicia al agregar un inoculado a un medio de cultivo, y representa el tiempo que requieren los organismos para aclimatarse a su nuevo ambiente y empezar a dividirse. La masa empieza a incrementarse después de que tiene lugar la división celular.
2. *La fase de crecimiento exponencial.* Existe siempre un exceso en la cantidad de alimento que rodea a los microorganismos, y la velocidad del metabolismo y crecimiento es solo una función de la habilidad del microorganismo para procesar el sustrato.

3. *La fase de declinación del crecimiento.* La velocidad de incremento de la masa bacteriana disminuye debido a la limitación en el suministro de alimento.
4. *La fase endógena.* Los microorganismos son forzados a metabolizar su protoplasma sin que haya reemplazo, debido a que la concentración de alimento disponible se encuentra al mínimo.



Fuente: Tchobanoglous y R. Crites, 2000.

Figura 1. Curva característica de crecimiento bacteriano en términos del registro de los organismos.

2.3.4 Cinética del crecimiento celular

Un sistema de tratamiento biológico, además de la comunidad biológica, requiere de un medio ambiente bien controlado, para su buen funcionamiento. Las condiciones ambientales óptimas se pueden obtener mediante la regulación del pH, de la temperatura, la adición de nutrientes o de elementos traza, la adición o exclusión de oxígeno, o mediante la mezcla adecuada del medio. El control de las condiciones ambientales, aseguran que los microorganismos dispongan del medio adecuado para su desarrollo.

La tasa de crecimiento de las células bacterianas, según Metcalf y Eddy (1996) se define mediante la siguiente ecuación:

$$r_g = \mu X$$

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

μ = tasa de crecimiento específico, tiempo⁻¹.

X = concentración de microorganismos, masa/volumen unitario.

Para un cultivo de alimentación discontinua (por lote), es decir que no tiene entradas ni salida de materiales, se tiene:

$$dX/dt = r_g$$

Entonces:

$$dX/dt = \mu X$$

2.3.5 Clasificación

Metcalf y Eddy, (1996), consideran que existen cinco grupos principales de tratamiento biológico:

- ◆ procesos aerobios. Se dan en presencia de oxígeno.
- ◆ procesos anaerobios. Ocurren en ausencia de oxígeno.
- ◆ procesos anóxicos. La oxidación de la materia orgánica ocurre con aceptores de electrones distintos al oxígeno (sulfato, nitrito, nitrato, etc.).
- ◆ Procesos aerobios, anaerobios y anóxicos combinados.
- ◆ Procesos de lagunaje.

En la tabla 1, se clasifica a los sistemas de tratamiento biológico, en base a la forma en que se encuentre la biomasa:

- a) Sistemas con biomasa suspendida. En ellos los microorganismos se encuentran libres dentro del tanque, requiriendo energía para realizar su mezclado.
- b) Sistemas con biomasa fija. Aquí los microorganismos se encuentran adheridos en un soporte.

Tabla 1. Sistemas biológicos de tratamiento.

Biomasa suspendida	aerobios	Lodos activados (9 variantes) Lagunas aireadas Lagunas de oxidación de alta tasa Nitrificación
	anóxicos	Tipo lodos activados Reactor de lecho ascendente
	anaerobio	Digestor de alta tasa Contacto anaerobio Reactor de lecho de lodos con flujo ascendente
Biomasa fija	aerobios	Filtro percolador Disco biológico rotatorio Filtro sumergido Lecho fluidificado
	anóxicos	Filtro sumergido Disco biológico rotatorio Lecho fluidificado
	anaerobio	Filtro anaerobio Disco biológico rotatorio sumergido Laguna anaerobia Lecho fluidificado
	combinado	Uso del suelo como método de tratamiento

Fuente: Jiménez, 2001.

2.4 Proceso biológico aerobio

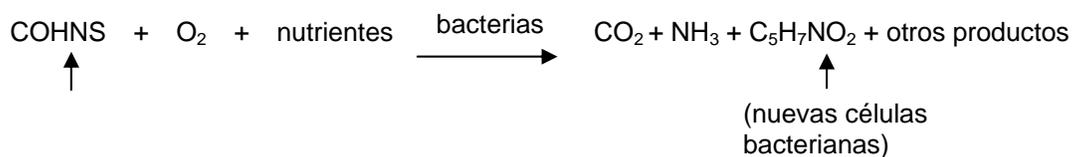
Para comprender mejor este proceso, que es la base de esta investigación, a continuación se hace referencia a él en forma más detallada.

2.4.1 Descripción

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 flóculos 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 dióxido de carbono, un proceso denominado mineralización, y parte se convierte en una materia nueva celular microbiana llamada asimilación (Winkler, 2000).

Las reacciones involucradas, según Metcalf y Eddy (1996), son las siguientes:

♦ **Oxidación y síntesis:**



♦ **Respiración endógena:**



En estas reacciones ocurren dos procesos bioquímicos:

1. Metabolismo celular. Este ocurre cuando los microorganismos utilizan parte del material en su crecimiento y reproducción formando nuevo material celular.
2. Metabolismo energético. Sucede al utilizar el material orgánico remanente para transformarlo en energía y utilizarla en sus movimientos y actividades; es importante mencionar que parte de la materia orgánica utilizada proviene del propio material celular, conociéndose a esta función como respiración endógena. En este proceso el producto es una mezcla de bióxido de carbono, agua y sales inorgánicas.

En los dos casos la utilización de oxígeno es primordial ya que la falta de este elemento impide totalmente el desarrollo del proceso.

2.4.2 Cinética de eliminación de sustrato

Cuando se tienen bajas concentraciones de sustrato, valores de DBO menores de 500 mg/l, la velocidad de eliminación de la materia orgánica sigue una cinética de primer orden (Ramalho, 1993). Metcalf y Eddy (1996), proponen las siguientes relaciones:

$$r_s = -K S$$

donde r_s = tasa de variación de la concentración, masa/volumen unitario* tiempo

K = constante de primer orden de la reacción, tiempo⁻¹.

S = concentración de materia orgánica (DBO, DQO, etc.), masa/volumen unitario.

Para un reactor discontinuo, se tiene:

$$dS/dt = r_s$$

entonces:

$$dS/dt = - K S$$

La constante K , también conocida como constante de degradación de la materia orgánica, tiene diferentes valores, que dependen del tipo de agua residual y de las condiciones ambientales que se tengan en el tratamiento. Para aguas residuales urbanas, se han encontrado valores de:

- 2 a 10 días⁻¹, valor típico 4, a 20°C (Tchobanoglous et al, 2000).
- 2 a 10 días⁻¹, valor típico 5, a 20°C (Metcalf y Eddy, 1991).
- 8 días⁻¹, a 20°C, para cuando la concentración se expresa en DBO (Eckenfelder, 1989).

2.4.3 Efecto de la temperatura

Tchobanoglous et al (2000), indica que el efecto de la temperatura sobre la velocidad de reacción de un proceso biológico se expresa de la siguiente manera:

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

donde r_T = velocidad de reacción a T °C.

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

θ = coeficiente de actividad-temperatura, varían de 1.00 a 1.10 dependiendo del proceso.

T = temperatura, en °C.

2.4.4 Eficiencia del proceso

Al realizarse un tratamiento al agua residual, es de gran importancia conocer que eficiencia o rendimiento está proporcionando dicho proceso. Este parámetro se calcula de la siguiente forma (Metcalf y Eddy, 1996):

$$E = ((S_0 - S)/S_0) * 100$$

Donde E = rendimiento o eficiencia del proceso, porcentaje.

S_0 = concentración del sustrato al inicio (alimentación).

S = concentración del sustrato al final (efluente).

En la tabla 2 aparecen eficiencias alcanzadas por diferentes procesos.

Tabla 2. Grado de tratamiento obtenido mediante diversas operaciones y procesos unitarios empleados en el tratamiento primario y secundario del agua residual.

Unidades de tratamiento	Rendimiento de eliminación del constituyente, porcentaje		
	DBO	DQO	Sólidos Suspendidos
Rejas de barras	nulo	nulo	Nulo
Desarenadores	0-5	0-5	0-10
Sedimentación primaria	30-40	30-40	50-65
Fangos activados (proceso convencional)	80-95	80-85	80-90
Filtros percoladores	65-80	60-80	60-85
Biodiscos (RBCs)	80-85	80-85	80-85
Cloración	nulo	nulo	nulo

Fuente: Metcalf y Eddy, 1996.

La comparación de los rendimientos de las instalaciones es de gran importancia en la elección y proyecto de los reactores, ya que se pueden predecir los resultados del tratamiento. En la mayoría de los sistemas, la eliminación se lleva a cabo en dos etapas: una primera etapa en la que se elimina del orden del 30% de la DBO, y una segunda en la que se elimina más del 55%.

2.4.5 Comparación del tratamiento aerobio con el anaerobio

En la tabla 3 se enlistan las ventajas y desventajas del tratamiento aerobio y del anaerobio.

Tabla 3. Tratamiento aerobio versus tratamiento anaerobio.

Aerobio	Anaerobio
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mayor eficiencia de eliminación. ▪ Operatividad comprobada. ▪ 50% de C es convertido en CO₂, 40-50% es incorporado dentro de la masa microbiana. ▪ 60% de la energía es almacenada en la nueva biomasa, 40% es perdido como calor. ▪ Ingreso de elevada energía para aireación. ▪ Limitación de cargas orgánicas. ▪ Se requiere adición de nutrientes. ▪ Requerimiento de grandes áreas. ▪ Sensible a economía de escala. ▪ Periodos de arranque cortos. ▪ Tecnología establecida. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Menor producción de lodos. ▪ Menores costos de operación. ▪ 95% de C es convertido en biogas; 5% es transformado en biomasa microbiana. ▪ 90% de la energía es retenida como CH₄, 3-5% es perdido como calor, 5-7% es almacenada en la biomasa. ▪ No requiere de energía. ▪ Acepta altas cargas orgánicas. ▪ Degrada compuestos policlorados. ▪ Requerimiento bajo de nutrientes. ▪ Se requiere pequeña área superficial. ▪ Largos periodos de arranque. ▪ Recientemente establecida, todavía bajo desarrollo para aplicaciones específicas.

Fuente: <http://www.miliarium.com/Proyectos/depuradoras/manuales/tesis/uasbll.asp> (recuperado 5 de febrero de 2003).

2.5 Pruebas de tratabilidad

Las pruebas de tratabilidad tienen la finalidad de determinar si los contaminantes de un efluente son susceptibles de ser eliminados mediante un sistema con la eficiencia requerida. Aunque implican costo, permiten ahorrar en la inversión, ya que se pueden descartar procesos que no se adapten al tipo de influente, prever interferencias y determinar los parámetros para el perfecto dimensionamiento y operación de una planta (Jiménez, 2001).

Según Jiménez (2001), las dos principales pruebas de tratabilidad que existen son: la prueba de jarras y la de determinación de las constantes de biodegradabilidad. La primera se refiere a un tratamiento de floculación-coagulación y la segunda a procesos biológicos.

2.5.1 Método de Eckenfelder

El método de Eckenfelder se refiere a los procesos biológicos aerobios, donde las pruebas de tratabilidad se realizan en laboratorios ya sea en operación en lote (discontinuo) o en continuo. El procedimiento propuesto por Eckenfelder (1966), para la operación en lote, consiste en lo siguiente:

1. Aclimatación del inóculo. Antes de llevar a cabo los experimentos es necesario aclimatar los lodos al agua residual que va a ser objeto de estudio. Se pueden utilizar lodos de alguna planta de tratamiento de aguas residuales. Al estar los microorganismos en contacto con el agua residual va a propiciar que algunos sean capaces de crecer y que otros mueran. Se requiere aproximadamente de una semana para estabilizar un cultivo activo para un agua residual específica.
2. Neutralizar el agua residual a $\text{pH } 7.0 \pm 0.5$, en caso necesario.
3. Añadir nutrientes, si se requiere, en la relación DBO:N:P de 60:3:1
4. Determinar la proporción de lodos a utilizar con respecto a la cantidad de materia orgánica (DBO, DQO).
5. Preparar la mezcla de agua residual y lodos en la cantidad suficiente para el llenado de los reactores. Ver figura 2.
6. Antes de iniciar la aireación, tomar una muestra para realizar el análisis posterior de DBO, DQO, pH y los sólidos suspendidos.
7. Posterior a la aireación determinar los sólidos suspendidos de la mezcla lodos-agua residual (licor mezcla).
8. Airear las muestras usando difusores de cerámica. El lodo biológico, sólidos suspendidos volátiles en el licor mezcla (SSVLM), se mantiene en estado de mezcla completa debido a la agitación proporcionada por el aire aplicado en el sistema.
9. Ajustar el flujo de aire, manteniendo cuando menos 2 mg/l de oxígeno disuelto.

10. Después de iniciar la aireación tomar muestras a diferentes intervalos de tiempo: 1, 30 y 60 minutos y 2, 4, 8, 12 y 24 horas. Se determinará en cada una de ellas la concentración de sustrato (S) del agua residual, medida como DBO y DQO soluble, previa filtración de la muestra. También se mide el oxígeno disuelto en los reactores.
11. La masa de lodo biológico acumulado se determina en esos mismos intervalos de tiempo, midiendo la concentración de SSVLM en las muestras extraídas y leyendo el volumen de líquido en el reactor indicado por la escala volumétrica.

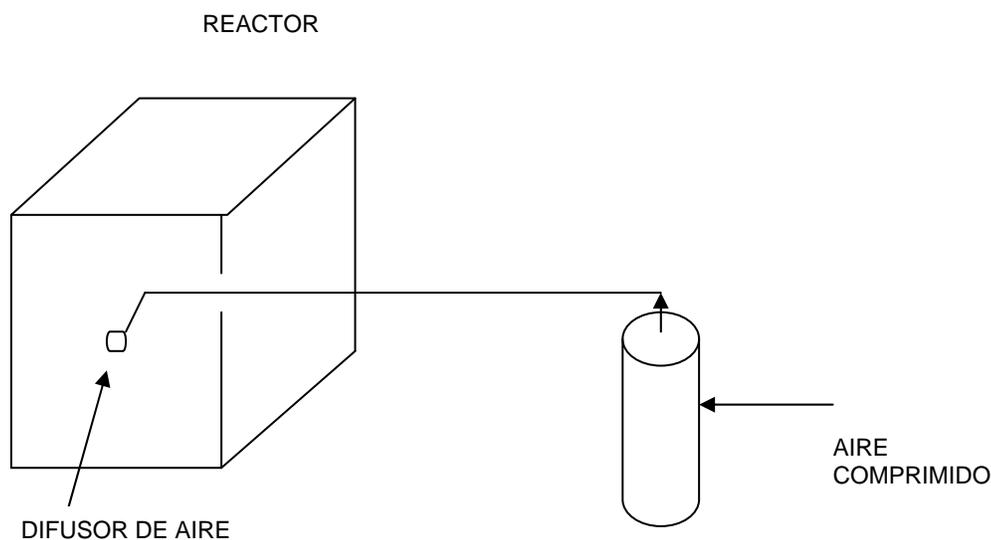
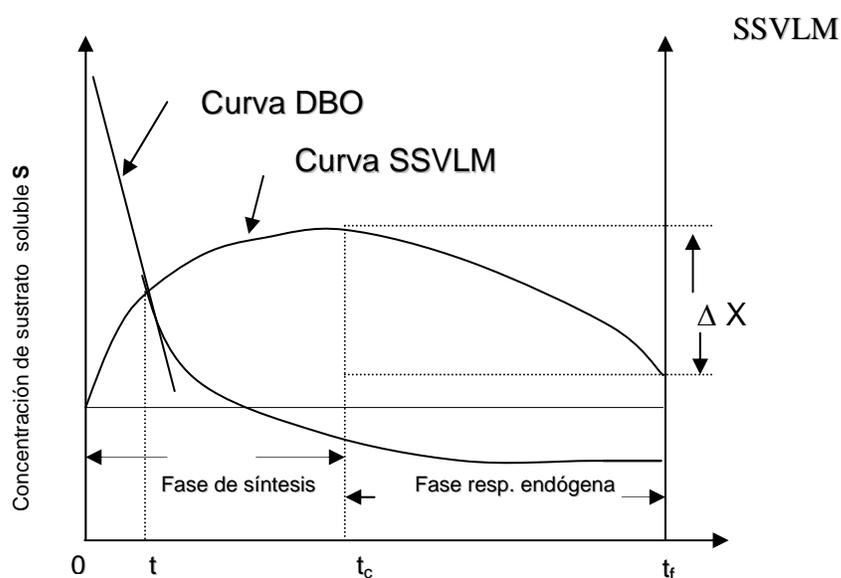


Figura 2. Reactor en cultivo en lote.

En la figura 3 se presentan curvas típicas de disminución de la concentración de sustrato soluble (S) y variación de la cantidad de SSVLM con el tiempo. La concentración de S (que es una medida de la concentración de la materia orgánica del agua residual), decrece con el tiempo conforme dicha materia orgánica se oxida.

La concentración de SSVLM aumenta al principio (desde el tiempo 0 al tiempo t_c), durante el periodo en que una concentración sustancial del sustrato se encuentra presente para proporcionar alimentación abundante para mantener el crecimiento de microorganismos. Este crecimiento corresponde a la síntesis de nuevas células, indicado en la figura 3 como fase de síntesis. Después del tiempo t_c , cuando la concentración de sustrato ha disminuido considerablemente, no hay suficiente alimento para mantener a los microorganismos. En este momento se empiezan a consumirse entre ellos, correspondiendo a la fase de respiración endógena.



Fuente: Ramalho, 1993.

Figura 3. Curvas típicas de la concentración de sustrato soluble y de los SSVLM en un reactor discontinuo.

2.5.2 Aplicaciones del método de Eckenfelder

Son diversos los estudios reportados en bibliografía en los cuales se utiliza este tipo de ensayo. Dentro de estos trabajos se citan los siguientes:

- ✓ Ugarte Selva et al (1998), en Argentina, llevaron a cabo ensayos a escala laboratorio de tipo discontinuo, para observar la biodegradabilidad del efluente de una industria vitivinícola y determinar los tiempos de residencia para los ensayos en continuo, en el estudio "Parámetros de diseño para el tratamiento biológico aerobio de efluentes de la industria vitivinícola", la reducción máxima de DQO soluble conseguida durante el ensayo fue del 90%, para un tiempo mayor a 20 horas. (<http://g.unsa.edu.ar/asades/actas2000/06-47.html>, recuperado 4 de febrero 2003).
- ✓ Finamore et al. (1999), de la Universidad Central de Venezuela determinaron las "Constantes cinéticas en un sistema de lodos activados a escala laboratorio", utilizando un sistema continuo, para las aguas residuales de Caracas Venezuela. Se encontró que para un tiempo de residencia, hidráulico y celular, mayor a 15 horas la DQO Y LA DBO soluble tiende a estabilizarse en 90%. La constante de degradación de materia orgánica encontrada fue de 0.64 d^{-1} , en base a la concentración en DBO.
- ✓ Gortares (1996), en el ITSON unidad Obregón, realizó una "Prueba de tratabilidad biológica a las aguas residuales de San Luis Río Colorado, en Sonora" para conocer sus constantes de degradabilidad biológica, utilizando un reactor discontinuo. En dicho estudio se obtuvo la eliminación de materia orgánica soluble: en DQO fue del 81.41% y en DBO de 93.36 % para un período de 70.5 horas de duración del experimento. Las constantes cinéticas de degradación de la materia orgánica encontradas fueron: 0.9169 d^{-1} (para DQO) y 0.8704 d^{-1} (para DBO).

III. MÉTODO

3.1 Ubicación del experimento

Las pruebas de tratabilidad se realizaron en el laboratorio de “Agua, Suelo y Planta” y en el de “Suelos”, pertenecientes a la Dirección de Recursos Naturales, del Instituto Tecnológico de Sonora, durante el periodo comprendido de Febrero del 2002 a Marzo del 2003.

3.2 Muestreo

Se realizaron muestreos representativos en los ciclos académicos de la institución, como se indica en la tabla 4.

Tabla 4. Calendarización de muestreos y de pruebas de tratabilidad.

SEMESTRE	MUESTREO	PRUEBA
enero-mayo 2002	8 de mayo	9 al 15 de mayo 2002
verano 2002	9 de junio 2002	10 al 12 de junio 2002
verano 2002	18 de junio 2002	19 al 24 de junio 2002
agosto-diciembre	28 agosto 2002	29 al 30 agosto
agosto-diciembre	2 de septiembre 2002	3 al 4 de septiembre 2002
agosto-diciembre	26 de septiembre 2002	27 al 28 de septiembre 2002
agosto-diciembre	6 de noviembre 2002	7 al 8 de noviembre 2002
enero-mayo 2003	17 de febrero 2003	18 al 19 de febrero 2003
enero-mayo 2003	17 de marzo 2003	18 al 19 de marzo 2003

La toma de muestra fue del colector principal de las aguas residuales del instituto, ubicado en Antonio Caso s/n, que trae consigo aguas utilizadas en sanitarios, comedor, cafetería y laboratorios (Ver figura 4).



Figura 4. Toma de muestra del agua residual.

Las muestras fueron tomadas un día antes de llevarse a cabo las pruebas de tratabilidad, a las 9:00 AM, siendo este horario cuando se presenta la mayor cantidad de población estudiantil, como lo ilustra la figura 5; para lo anterior se utilizaron 3 recipientes (porriones) de plástico, previamente lavados, con una capacidad de 20 litros cada uno. Para su conservación fueron transportadas de inmediato al laboratorio y almacenadas a temperatura controlada de 20°C .

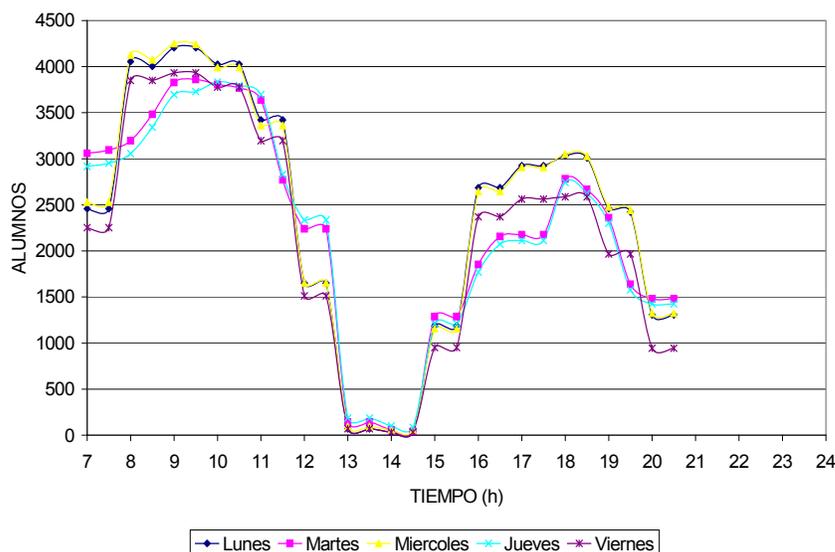


Figura 5. Variación de la población de alumnos en el semestre enero-mayo de 2002 (Datos proporcionados por el Departamento de Registro Escolar del ITSON, 2002).

3.3 Equipo y material

El material y equipo utilizado en las pruebas de tratabilidad fue el siguiente:

- 3 reactores rectangulares de acrílico, cuyas dimensiones son 32X28X21 cm, con un volumen útil de 15 litros (ver figura 6).
- 1 compresor, marca Industrial Torreón, S.A., modelo I-4348-HL, de 5 HP. Para suministro del aire necesario a los reactores.
- 1 distribuidor de aire, de PVC, con 8 válvulas, de las que se usaron solo 3, para regular el flujo de aire a los reactores.

- Mangueras de conexión, de plástico, con un diámetro de 0.5 cm.
- 3 difusores de piedra porosa, de 7X2.5X2 cm, su función fue distribuir el oxígeno en el reactor y lograr la mezcla completa.
- Papel filtro whatman no. 1.
- 1 medidor manual de pH, marca Hanna Instruments.
- 1 medidor de oxígeno disuelto, marca Thermo Orion.
- Material y equipo de laboratorio para determinar DBO, DQO y SSV.



Figura 6. Reactores utilizados en las prueba de tratabilidad.

3.4 Inóculo

El inóculo se obtuvo de los lodos aerobios de la laguna de sedimentación, de la Planta para el tratamiento de aguas residuales de Cd. Obregón, Sonora, ubicada en la calle Kino y 400.

3.4.1 Aclimatación de los lodos

Se centrifugaron 900 ml de los lodos sedimentados, se decantaron, se lavaron con agua residual y volvieron a centrifugar. Se tiró el sobrenadante y los lodos se distribuyeron en partes iguales en los tres reactores, junto con agua residual y suministro de aire.

Para determinar la cantidad de lodos que habría que añadir en cada reactor, se tomó como base lo recomendado por Metcalf y Eddy (1996), el cual establece que para un sistema aerobio, para aguas residuales domésticas, la relación F/M deberá encontrarse entre 0.05 y 1.0. La relación F/M se calcula con la siguiente ecuación:

$$F/M = S_0 / (\theta X)$$

Donde: F/M = relación alimento/microorganismos, d⁻¹.

S₀ = Concentración de DBO o DQO en el afluente, kg/m³.

Θ = tiempo de retención hidráulica en el tanque de aireación, d.

X = concentración de sólidos suspendidos volátiles en el tanque de aireación, kg/m³.

El periodo de aclimatación fue de una semana, según lo recomendado por Eckenfelder (1966), trabajando los reactores en operación en lote. Cuando no se realizó experimento, los lodos estuvieron en mantenimiento, cambiándoles el agua residual cada tres días y con constante aireación. Solamente en los periodos vacacionales, quince días en verano y quince días en invierno, fueron decantados y guardados en refrigeración, para volverse a aclimatar cuando fueron utilizados.

3.5 Operación del sistema

A continuación se describe como se llevaron a cabo los experimentos.

3.5.1 Etapa inicial

La muestra se dejó sedimentar, se decantó y conservó en una cubeta limpia.

3.5.2 Operación

- Previamente se drenó el agua de los reactores al máximo para dejar principalmente los lodos aclimatados.

- A continuación se añadió el agua residual hasta un volumen de 10 o 11 litros en cada uno de los 3 reactores y se guardó muestra para determinar la DBO y DQO iniciales.
- De inmediato se empezó a burbujear el aire, regulando el flujo de éste, para obtener una concentración de oxígeno disuelto superior a 2 mg/l, en base a lo recomendado por Ramalho (1993).
- Enseguida se procedió a tomar muestra para SSV y se midió temperatura, volumen del reactor, oxígeno disuelto y pH iniciales.
- A partir de ese momento, en intervalos de tiempo preestablecidos, se tomaron muestras para determinar la DQO soluble y los SSV, y también se realizaron lecturas de temperatura, volumen del reactor, oxígeno disuelto y pH.
- Al terminar el tiempo de la prueba, además de realizar lo anterior, se tomaron muestras para DBO soluble en cada uno de los reactores.

En este caso no fue necesario añadir nutrientes ni modificar el pH de las muestras, debido a que los análisis de caracterización del agua residual así lo indicaban, encontrándose en los niveles aceptables para la degradación biológica.

Es importante mencionar que inicialmente se manejaron diferentes intervalos de tiempo en las corridas experimentales, para determinar el más adecuado, basándose para ello en la eliminación de materia orgánica.

3.6 Determinación de los parámetros involucrados

Los análisis de la DBO, DQO y de los SSV fueron realizados en base a las técnicas establecidas en Los Métodos Normalizados (APHA, AWWA, WPCF, 1992).

3.7 Eficiencia del proceso

A partir de los resultados obtenidos de DBO y de DQO soluble, se obtuvo la eficiencia

del proceso, en cuanto a la eliminación de materia orgánica, mediante la ecuación ya citada anteriormente.

3.8 Determinación de la constante cinética de biodegradación

En base a lo citado anteriormente, la reacción de oxidación de la materia orgánica corresponde a una reacción de primer orden y si ésta se realiza en un reactor discontinuo, se obtiene la siguiente ecuación:

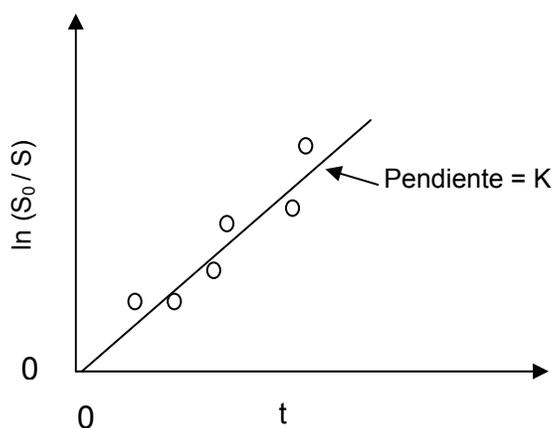
$$dS / dt = - K S$$

Donde K es la constante de biodegradación de materia orgánica.

Si se integra, desde $S = S_0$ hasta $S = S$, y para un tiempo $t = 0$ hasta $t = t$, tenemos:

$$\ln (S_0 / S) = K t$$

En este experimento se obtuvo la constante K, a partir de los logaritmos de la concentración de DQO soluble contra el tiempo (ver figura 7), apoyándose en el paquete excell, utilizando regresión lineal.



Fuente: Levenspiel, 1998.

Figura 7. Ensayo de la reacción de primer orden.

3.9 Criterios estadísticos para la decisión de los análisis de regresión lineal

A partir de la regresión lineal que se efectuó para el cálculo de cada una de las constantes de degradación de materia orgánica, se obtuvieron valores de R^2 , conocido como coeficiente de determinación. En la tabla 5 se muestran los criterios de decisión para dicho coeficiente.

Tabla 5. Criterios de decisión para los análisis estadísticos.

REGRESIÓN LINEAL (R^2)	
0.5 a 1.0	Es satisfactorio para explicar la variación observada en las variables dependientes.
0.5 a 0.25	Es útil para explicar la variación observada.
\leq a 0.25	Es de poca utilidad para explicar la variación observada.

Fuente: Berenson y Levine, 1996.

V. CONCLUSIONES

En los diversos experimentos realizados se confirmó que la materia orgánica del agua residual, expresada como DQO y DBO soluble, se degradó más del 70%.

A las 6 horas de tratamiento se tuvo una eliminación de la materia orgánica (DQO soluble) de alrededor del 60% y a partir de las 8 horas, fue de valores cercanos o mayores al 70%, siendo muy poco el incremento.

A las 24 horas de realizados los experimentos se lograron eficiencias que varían del 70 al 86%, para DQO soluble, y del 84 al 98% para DBO soluble.

Por lo anterior se concluye que las aguas residuales del ITSON, unidad Náinari, son biodegradables.

Las constantes cinéticas obtenidas, variaron dependiendo del ciclo académico del ITSON, en el que se realizaron las pruebas de tratabilidad, siendo el valor mínimo de 0.55 d^{-1} ($R^2=0.99$) y el máximo de 3.65 d^{-1} ($R^2=0.94$).

El valor de las constantes cinéticas aumentó a medida que se fueron haciendo las pruebas, lo que tiene relación con las características del agua residual, la adaptabilidad de los microorganismos a ella y al aumento de la biomasa activa.

BIBLIOGRAFÍA

APHA, AWWA y W.P.C.F. 1992. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Ediciones Díaz de Santos, S.A. España. 2-83 a 2-87, 5-2 a 5-20.

Berenson, M. L., Levine, M.D. 1996. Estadística básica en administración de conceptos y aplicaciones. Editorial Prentice May. 6ta. Edición. México. Pp 325-550.

Comisión nacional del agua (CNA). 2001. Programa nacional hidráulico 2001-2006. México. Ver: www.cna.gob.mx/portal/publicaciones/PNH0106/El_agua_recurso_1.pdf, recuperado 23 de enero 2003.

_____.2003. Ley federal de derechos, normas aplicables en materia de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes 2003. México. Ver: www.cna.gob.mx/portal/publicaciones/leyes/LEY_FEDERAL_DE_DERECHOS_NORMAS_APLICABLES_EN_MATERIA_DE_AGUA_1.pdf, recuperado 26 de mayo 2003.

Droste, R. 1997. Theory and practice of water and wastewater treatment. Jhon Wiley & Sons, Inc. EE. UU. Pp 219-234.

Eckenfelder, W. W. 1989. Industrial water pollution control. 2da. Edición. McGraw-Hill, Inc. EE. UU. Pp 151-155.

_____.1966. Industrial water pollution control. McGraw-Hill, Inc. EE. UU. Pp 178-182.

Enkerlin, E., G. Cano, R. A. Garza, E. Vogel. 1997. Ciencia Ambiental y Desarrollo Sostenible. International Thomson Editores. México. Pp 246-247.

Fair, G., J. C. Sélter, D. A. Okun. 1999. Purificación de aguas y tratamiento y remoción de

- aguas residuales. Trad. S. Ayanegui J. Limusa S.A. de C.V y Grupo Noriega editores. México. Tomo 2. Pp 531-566.
- Finamore, C., H. Blanco, E. López. 1999. Constantes cinéticas en un sistema de lodos activados a escala laboratorio. Revista de la facultad de ingeniería universidad central de Venezuela. Ver: <http://revele.ing.ucv.ve/revele/foro/indice.asp>, recuperado 10 de octubre de 2002.
- Gortares, P. 1996. Prueba de tratabilidad biológica de las aguas residuales de San Luis Río Colorado, Sonora. Instituto Tecnológico de Sonora. México. Informe técnico.
- Henze M., P. Harremoes, J. Cansen, E. Arvin. 1997. Wastewater treatment. 2da edición. Springer. Alemania. Pp 26-31.
- Horan N. J. 1990. Biological Wastewater Treatment Systems. John Wiley & sons. Inglaterra. Pp 1-40.
- ITSEMAP ambiental. 1994. Manual de contaminación ambiental. Fundación MAPFRE. España. Pp 57-117.
- Jiménez, B.E. 2001. La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada. Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C., Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA. México, D.F. Pp 204-258.
- Levenspiel, O. 1998. Ingeniería de las reacciones químicas. Ediciones REPLA, S.A. México, D.F. Pp 46-51.
- Metcalf, Eddy. 1996. Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización. Trad. J. de D. Trillo M. Mc Graw Hill. México, Volumen 1. Pp 1- 14, 53-126, 141-147, 191-202, 409-438, 606-627.

- _____. 1991. Wastewater engineering, treatment, disposal, and reuse. 3er. ed. Mc Graw Hill. EE. UU. Pp 393-394.
- Population Information Program, Center for Communication Programs, The Johns Hopkins School of Public Health. Soluciones para un mundo con escasez de agua, Volumen XXVI, Número 1. USA. Ver <http://www.jhuccp.org/pr/prs/sm14edsum.shtml>, recuperado 12 de febrero 2003.
- Ramalho, R. S. 1993. Tratamiento de aguas residuales. Reverté S.A. Pp 29-51, 253-380.
- SEMARNAT. 2003. Acuerdo por el cual se reforma la nomenclatura de las normas oficiales mexicanas expedidas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, así como la ratificación de las mismas previa a su revisión quinquenal. Revista Diario Oficial de la Federación. Pp 9-18.
- Tchobanoglous, G., R. Crites. 2000. Sistemas de Manejo de Aguas Residuales para núcleos pequeños y descentralizados. trad. M. Camargo. Mc Graw-Hill Interamericana S.A. Colombia. Tomo 1. Pp 220-292, 408-428.
- Ugarte, S., J. Fernández, M. Arreffhini, L. Denita, C. Herrero. 1998. Parámetros de diseño para el tratamiento biológico aerobio de efluentes de la industria vitivinícola. Grupo de estudios para el tratamiento de aguas residuales. Instituto de medio ambiente y facultad de ingeniería. Centro universitario. Argentina. Ver: <http://g.unsa.edu.ar/asades/actas2000/06-47.html>, recuperado 4 de febrero 2003.
- Unda, F. 1999. Ingeniería sanitaria aplicada a saneamiento y salud pública. Limusa S.A. de C.V y Grupo Noriega editores. México. Volumen I. Pp 131-137.
- WEF, ASCE. 1992. Design of municipal wastewater treatment plants. 2da. Ed. EE.UU. Pp 389-675.
- Winkler, M. A., 2000. Tratamiento biológico de aguas de desecho. Limusa S.A. de C.V. Grupo Noriega Editores. México. Pp 15, 87, 316.