

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS



APLICACIÓN DE *Chlorella vulgaris* EN EL TRATAMIENTO  
DE AGUA RESIDUAL

POR

LUIS FELIPE SIERRA LUNA

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO. SEPTIEMBRE DE 2006

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

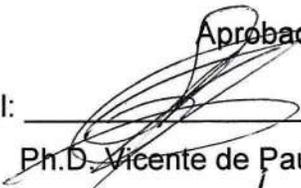
APLICACIÓN DE *Chlorella vulgaris* EN EL TRATAMIENTO DE AGUA  
RESIDUAL

Tesis que se somete a la consideración del comité particular de asesoría  
y aprobado como requisito parcial para obtener el título de:

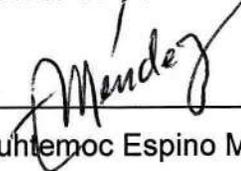
INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Aprobado por:

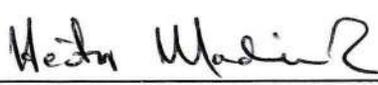
Asesor principal: \_\_\_\_\_

  
Ph.D. Vicente de Paúl Álvarez Reyna

Coasesor: \_\_\_\_\_

  
Ing. Cuauhtemoc Espino Méndez

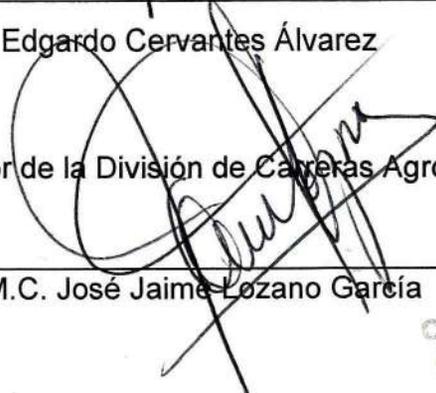
Asesor: \_\_\_\_\_

  
Dr. Héctor Madinaveitia Ríos

Asesor: \_\_\_\_\_

  
M.C. Edgardo Cervantes Álvarez

Coordinador de la División de Carreras Agronómicas

  
M.C. José Jaime Lozano García



Coordinación de la División  
de Carreras Agronómicas

Torreón, Coah.; Septiembre de 2006

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

APLICACIÓN DE *Chlorella vulgaris* EN EL TRATAMIENTO DE AGUA  
RESIDUAL

Tesis que se somete a la consideración del H. Jurado examinador como  
requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Aprobado por:

Presidente: \_\_\_\_\_

Ph.D. Vicente de Paúl Álvarez Reyna

Vocal: \_\_\_\_\_

Ing. Cuauhtémoc Espino Méndez

Vocal: \_\_\_\_\_

Dr. Héctor Madinaveitia Ríos

Vocal suplente: \_\_\_\_\_

M.C. Edgardo Cervantes Álvarez

Coordinador de la División de Carreras Agronómicas

M.C. José Jaime Lozano García



Coordinación de la Dv  
de Carreras Agronóm

Torreón, Coah.; Septiembre de 2006

## AGRADECIMIENTOS

A dios padre, por darme la capacidad para concluir mis estudios de licenciatura.

A mis padres, Alfredo Sierra Corral y Silvia Raquel Luna Sotelo, por permitirme y apoyar en mis estudios, no obstante los sacrificios que han tenido que realizar, así como por inculcarme valores y ética, cosas que valen mas que lo material.

A mis hermanas, Silvia Paola y Bertha Araceli, por su apoyo moral, enseñanzas y experiencias compartidas durante toda mi vida.

A mis familiares por su apoyo y buenos deseos durante estos años, en la ciudad de Hidalgo del Parral, Chih., mi tierra adoptiva.

.....

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por ser una institución dedicada a satisfacer las necesidades primordiales de todos los pueblos del planeta: la producción de alimentos, sean de origen vegetal o animal, así como la preservación del medio ambiente; la cual me abrió sus puertas y me brindó diversas oportunidades para mi desarrollo.

Al Dr. Vicente de Paúl Álvarez Reyna, por encaminarme a este proyecto y su invaluable asesoría en la conformación de la presente tesis desde su inicio hasta su culminación.

Al Ing. Cuauhtémoc Espino Méndez, por permitirme integrarme al proyecto y todas las facilidades brindadas en el trabajo experimental

realizado en la planta tratadora de agua residual de la Universidad Tecnológica de Torreón.

Al Dr. Héctor Madinaveitia Ríos por su esfuerzo y paciencia en las revisiones hechas a esta tesis.

.....

Al M.C. Hugo Aguilar Márquez, por los conocimientos aportados en mi formación como profesionista, por su ayuda, consejos y apoyo en la mayor parte del tiempo que estuve en la UAAAN

Al Dr. Mario García Carrillo, por su interés y los conocimientos aportados en mi formación profesional

.....

A mis compañeros de la V generación (2001 – 2005) de Ingeniero en Procesos Ambientales: María Isabel Salas Martínez, Misael Vázquez Ortiz, Marco Antonio Wong Maynes, Juan Aranda García, Nelly Bautista Montoya, Porfirio Castro Fraustro, Audelin Roblero Cortés y Guilver Rene Velásquez; por compartir momentos buenos y memorables, lo mismo que difíciles y tristes, haciendo que mi estancia en la UAAAN fuera mas fácil, así como también por ayudarme y permitirme ser amigo de cada uno de ustedes.

A mis amigos y paisanos: Luis García Fuentes, Simón Prieto Lazos, Luis Prieto Jurado, Héctor Díaz Díaz, Nahum Díaz Fontes, Víctor Ceballos Lerma, Edgar Holguín Bustillos, Miguel Ángel Jaquez, Javier y Eric Yáñez

Pérez, Omar Eng Navarro, Ulises Vargas Salcido, Elías Varela Olivas, Noel Castro, José Guadalupe Villegas y Carlos Cruz Nevares; a los cuales agradezco compartir tantas andanzas y por hacer menos intensa mi nostalgia por el estado grande y de mayor calidad mi estancia en la Narro.

A dos grandes amigos: Ing. José Roberto Luna Soto, por su amistad y tantos buenos recuerdos a lo largo de casi ya diez años, y al Ing. Jairo Omar Inzunza López, por compartir tiempos alegres y difíciles aquí en la comarca lagunera.

# ÍNDICE

TEMA	PAGINA
ÍNDICE GENERAL.....	i
ÍNDICE DE CUADROS.....	iv
RESUMEN.....	vii
SUMMARY.....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	4
2.1 Objetivo general.....	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
III. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
3.1 Calidad del agua.....	5
3.2 Agua disponible.....	5
3.2.1 Consumo de agua a nivel mundial.....	6
3.2.2 El agua en México.....	6
3.2.3 El uso del agua en México.....	7
3.3 Escasez del agua.....	7
3.3.1 Reutilización del agua residual tratada.....	8
3.3.2 Reutilización del agua residual en México...	8
3.3.3 Agua potable, alcantarillado y tratamiento de agua residual en México.....	10
3.4 Porcentaje de procesos de tratamiento en efluentes municipales.....	10
3.4.1 Tendencia actual de las necesidades de tratamiento del agua residual en México....	11
3.5 Contaminación del agua.....	11
3.5.1 Contaminantes convencionales del agua....	12
3.6 Clasificación de los compuestos presentes en agua residual de acuerdo a su naturaleza.....	12
3.6.1 Físicos.....	12
3.6.2 Químicos.....	12
3.6.3 Biológicos.....	13
3.7 Agua residual.....	13
3.7.1 Constituyentes del agua residual.....	14
3.7.2 Componentes del agua residual urbana.....	14
3.7.3 Tipo de agua residual.....	14
3.7.4 Fuentes de agua residual.....	15
3.7.5 Composición típica del agua residual de alcantarillado domestico.....	15
3.8 Descargas residuales.....	16
3.8.1 Calidad de las descargas.....	16
3.8.2 Agua cruda y agua tratada.....	16
3.9 Composición física del agua residual.....	17
3.9.1 Color.....	17

3.9.2 Olor.....	17
3.9.3 Sabor.....	18
3.9.4 Temperatura.....	18
3.9.5 Turbiedad.....	18
3.9.6 Sólidos.....	19
3.10 Tamaño de partículas presentes en agua residual.....	19
3.11 Parámetros que determinan la calidad del agua residual.....	20
3.11.1 Conductividad eléctrica.....	20
3.11.2 Materia orgánica.....	20
3.11.3 Grasas y aceites.....	21
3.11.4 Materia inorgánica.....	21
3.11.5 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)...	22
3.11.6 Demanda química de oxígeno (DQO).....	23
3.11.7 Carbono orgánico total .....	24
3.11.8 Nitrógeno.....	24
3.12 Utilidad de los constituyentes encontrados en el agua residual con respecto a sus características físicas, químicas y biológicas....	26
3.12.1 Características físicas.....	26
3.12.2 Características químicas inorgánicas.....	27
3.12.3 Características químicas orgánicas.....	27
3.12.4 Características biológicas.....	28
3.13 Principales constituyentes de interés en el tratamiento de agua residual.....	28
3.14 Parámetros biológicos.....	29
3.14.1 Componentes microbiológicos.....	29
3.14.2 Tipos de microorganismos presentes en agua residual.....	29
3.14.3 Patógenos en el agua residual domestica..	30
3.15 Procesos de tratamiento del agua residual.....	31
3.15.1 Tratamientos físicos.....	31
3.15.2 Tratamientos químicos.....	31
3.15.3 Tratamientos biológicos.....	31
3.15.4 Sistemas de tratamientos aerobios.....	33
3.15.5 Tratamiento biológico del agua residual....	34
3.15.6 Principios de la oxidación biológica.....	34
3.15.7 Lodos activados.....	35
3.15.8 Mecanismos del sistema de lodos activados.....	37
3.16 Marco legislativo en México para la contaminación del agua.....	39

TEMA	PAGINA
3.16.1 Normatividad ambiental en materia de agua residual.....	40
3.17 <i>Chlorella vulgaris</i> .....	40
3.17.1 Taxonomía de <i>Chlorella vulgaris</i> .....	42
3.18 Biorremediación de agua residual.....	42
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	45
4.1 Localización del área de estudio.....	45
4.2 Funcionamiento del sistema.....	46
4.3 Uso del agua residual tratada.....	48
4.4 Análisis del agua residual tratada durante 2004...	49
4.5 Problemática en la PTAR de la UTT.....	51
4.6 Solución a la problemática.....	51
4.7 Aplicación del producto en la PTAR.....	52
4.7.1 Dosificación inicial.....	52
4.7.2 Dosificación diaria.....	53
4.8 Parámetros analizados.....	54
4.8.1 Parámetros físicos.....	54
4.8.2 Parámetros químicos.....	54
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
5.1 Parámetros químicos del agua residual tratada en la PTAR – UTT.....	55
5.1.1 Grasas y aceites.....	55
5.1.2 Demanda bioquímica de oxígeno.....	57
5.1.3 Nitrógeno total.....	59
5.1.4 Acidez.....	61
5.1.5 pH.....	62
5.1.6 Conductividad eléctrica.....	64
5.2 Parámetros físicos del agua residual tratada.....	66
5.2.1 Sólidos suspendidos totales.....	66
5.2.2 Sólidos volátiles.....	68
5.2.3 Color.....	70
5.2.4 Olor.....	72
VI. CONCLUSIONES.....	74
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	75

## ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO		PAGINA
1	Parámetros y resultados del agua residual tratada de la UTT y los máximos permisibles según la NOM – 001 – SEMARNAT – 1996, para el año 2004.....	50
2	Dosificaciones inicial y diaria de <i>Chlorella vulgaris</i> en la PTAR – UTT, agosto de 2005	53
3	Evaluación de la concentración de grasas y aceites en agua residual antes y después de la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i> en la PTAR – UTT, agosto de 2005.....	56
4	Eficiencia global en la reducción de la concentración de grasas y aceites en agua residual, derivada de la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i> en la PTAR – UTT, agosto de 2005.....	56
5	Evaluación de la demanda bioquímica de oxígeno en agua residual antes y después de la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i> en la PTAR – UTT, agosto de 2005.....	58
6	Eficiencia global en la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno en agua residual, derivada de la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i> en la PTAR – UTT, agosto de 2005.....	58
7	Evaluación de la concentración de nitrógeno total en agua residual antes y después de la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i> en la PTAR – UTT, agosto de 2005	60

8	Eficiencia global en la reducción de la concentración de nitrógeno total en agua residual, derivada de la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i> en la PTAR – UTT, agosto de 2005.....	60
9	Evaluación de la acidez en agua residual antes y después de la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i> en la PTAR – UTT, agosto de 2005.....	61
10	Evaluación del pH en agua residual antes y después de la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i> en la PTAR – UTT, agosto de 2005	63
11	Eficiencia global en la reducción del pH en agua residual, derivada de la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i> en la PTAR – UTT .....	63
12	Evaluación de la conductividad eléctrica en agua residual antes y después de la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i> en la PTAR – UTT, agosto de 2005.....	65
13	Eficiencia global en la reducción de la conductividad eléctrica en agua residual, derivada de la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i> en la PTAR – UTT, agosto de 2005	65
14	Evaluación de la concentración de sólidos suspendidos totales en agua residual antes y después de la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i> en la PTAR – UTT, agosto de 2005	67
15	Eficiencia global en la reducción de la concentración de sólidos suspendidos totales en agua residual, derivada de la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i> en la PTAR – UTT, agosto de 2005.....	67

16	Evaluación de la concentración de sólidos volátiles en agua residual antes y después de la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i> en la PTAR – UTT, agosto de 2005.....	69
17	Eficiencia global en la reducción de la concentración de sólidos volátiles en agua residual, derivada de la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i> en la PTAR – UTT, agosto de 2005.....	69
18	Evaluación del color en agua residual antes y después de la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i> en la PTAR – UTT, agosto de 2005	71
19	Evaluación del olor en agua residual antes y después de la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i> en la PTAR – UTT, agosto de 2005	73

## RESUMEN

El agua residual es aquella generada tras los diversos usos dados al agua de abastecimiento público, tales como doméstico, comercial, industrial, servicios, agropecuario, etc., los cuales adicionan a esta compuestos orgánicos e inorgánicos que le impiden ser nuevamente utilizada.

El agua residual requiere ser purificada por dos razones principales; la primera de ellas, debido a que si se permite su acumulación y estancamiento, la descomposición de la materia orgánica que contiene, conduce a la formación de gases tóxicos y de olor agresivo, contiene también nutrientes que facilitan la eutrofización, microorganismos patógenos, así como compuestos tóxicos. La segunda, es la escasez de agua potable a nivel regional, nacional y mundial, que vinculada al incremento de la población mundial, habla por sí sola de la importancia del tratamiento del agua residual y su reutilización.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la microalga *Chlorella vulgaris*, sobre la calidad del agua residual tratada por el proceso de lodos activados.

Esta evaluación se llevó a cabo en la planta de tratamiento de agua residual de la Universidad Tecnológica de Torreón, mediante una dosificación inicial y una dosificación diaria durante 5 días, de *Chlorella vulgaris*, mediante un producto biorremediador comercial líquido. Se tomaron muestras de agua residual cruda y de agua residual tratada, a la cual en el proceso de tratamiento se adicionó *Chlorella vulgaris*. En ambas muestras se analizaron parámetros químicos (grasas y aceites, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno total, acidez, pH y conductividad eléctrica) y físicos (sólidos suspendidos totales, sólidos volátiles, color y olor).

En base a los resultados obtenidos se concluye que la aplicación de *Chlorella vulgaris* en el tratamiento de agua residual por el proceso de

lodos activados, reduce la demanda bioquímica de oxígeno, grasas y aceites, nitrógeno total, conductividad eléctrica, sólidos suspendidos totales y sólidos volátiles. Además, permitió una ligera mejoría en la reducción del olor; no afectando la acidez y el color. En el pH, provoca un incremento, debido probablemente a una interrupción del proceso de tratamiento.

En general, se puede decir que la aplicación de *Chlorella vulgaris* ayuda a mejorar la calidad del agua en base a lo observado en los diferentes parámetros analizados.

## SUMMARY

The wastewater is that generated after the diverse given uses to the water of public supply, such domestic use, commercial, industrial, services, agricultural, etc., which add it organic and inorganic compounds that impede it being again used.

The wastewater requires be purified for two main reasons; the first of them, because if is permitted its accumulation and stagnation, the discompose of the organic matter that contains, leads to the gases toxic formation and of aggressive scent, it also contains nutrients that facilitate the eutrofization, pathogenic microorganisms, as well as toxic compounds.

The second one, is the shortage of drinkable water at regional, national and world levels, that linked to the increment of the world population, it speak by itself of the importance of the treatment of the wastewater and their reuse.

The objective of this work was evaluate the effect of the microalgae *Chlorella vulgaris*, on the quality of the wastewater tried by the process of activated muds.

This evaluation was carried out in the plant of treatment of wastewater of the Technological University of Torreón, by means of an initial dose and a daily dose for 5 days, of *Chlorella vulgaris*, by means of a commercial liquid bioremedial product. Were taken samples of crude wastewater and of tried wastewater, to which in the process of treatment *Chlorella vulgaris* was added. In both samples chemical parameters were analyzed (fats and oils, biochemical demand of oxygen, total nitrogen, acidity, hydrogen potential and electric conductivity) and physical (suspended total solids, volatile solids, color and scent).

Based on the obtained results, is concluded that the application of *Chlorella vulgaris* in the treatment of wastewater for the process of activated muds reduces the biochemical demand of oxygen, fats and oils, total nitrogen, electric conductivity, suspended total solids and volatile

solids. Also, it permitted a slight improvement in the reduction of the scent, not affecting the acidity and the color. The hydrogen potential was increased, due probably to an interruption of the process of treatment.

In general it could be said that *Chlorella vulgaris* helps to improve the quality of the water based on the observed in the several evaluated parameters.

## I. INTRODUCCIÓN

La comunidad genera residuos sólidos y líquidos. La fracción líquida (agua residual), es esencialmente el agua que se desprende de la comunidad una vez que ha sido contaminada por los diferentes usos en los cuales ha sido empleada. Desde el punto de vista de la fuente de generación, se puede definir el agua residual como la combinación de residuos líquidos o aguas portadoras de residuos, procedentes tanto de residencias, instituciones públicas, establecimientos industriales y comerciales, a los que pueden agregarse eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales.

Si se permite la acumulación y estancamiento del agua residual, la descomposición de la materia orgánica que contiene conduce a la generación de grandes cantidades de gases de olor agresivo. Además, es frecuente la presencia en el agua residual bruta, de numerosos microorganismos patógenos causantes de enfermedades o que pueden estar presentes en ciertos residuos industriales. Adicionalmente, suele contener nutrientes que pueden estimular el crecimiento de plantas acuáticas y puede incluir también compuestos tóxicos. Es por esto que la evacuación inmediata y sin molestias del agua residual de sus fuentes de generación, seguida de su tratamiento y eliminación es deseable y necesaria en toda sociedad.

Aproximadamente el 97 % del total del agua disponible se encuentra en los océanos y otros cuerpos de agua salina y no se puede utilizar para diversos propósitos. Del restante 3 %, casi 2 % se encuentra distribuida en los témpanos de hielo, glaciares, en la atmósfera o mezclada con el suelo, por lo que es inaccesible. De tal forma que para el desarrollo y sostenimiento de la vida humana con sus diversas actividades industriales y agrícolas, se dispone aproximadamente de 0.62 % del agua restante, que se encuentra en lagos de agua fresca, ríos y acuíferos.

Salvo casos particulares, el agua usada no puede ser devuelta tal cual al medio ambiente, sin recibir un adecuado tratamiento de depuración. El tratamiento del agua es una de las formas más antiguas de protección para la salud pública. Desde hace años, el hombre ha tratado el agua para eliminar residuos, riesgos a la salud y mejorar su calidad en cuanto apariencia, olor, color y sabor. Desde épocas muy antiguas se trataba el agua hirviéndola, exponiéndola al sol, depositándola en recipientes para su sedimentación o filtrándola a través de arena o grava para purificarla.

Actualmente, muchas de estas técnicas son utilizadas para el tratamiento del agua, ya sea de abastecimiento o agua residual y se complementan con técnicas físicas y químicas modernas.

Existe una gran variedad de procesos para el tratamiento del agua, los cuales se pueden clasificar en tres categorías:

- **Tratamientos físicos**
- **Tratamientos químicos**
- **Tratamientos biológicos**

El tratamiento biológico parece ser muy versátil y rentable cuando la concentración de contaminantes en el agua residual es relativamente baja y los volúmenes a tratar son grandes, de esta forma, resulta poco atractivo el uso de otras alternativas de tratamiento, como por ejemplo, la incineración.

La planta tratadora de agua residual de la Universidad Tecnológica de Torreón contaba principalmente con los siguientes problemas: olores desagradables e insoportables en el perímetro de la planta de tratamiento, demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en el límite máximo permisible, generación de lodos al máximo en la fosa de agua residual, generación de lodos al máximo en los 5 tanques de la planta tratadora e inexistencia del análisis de agua residual para conocer la eficiencia de la planta de tratamiento, por lo que se planteó la aplicación de la microalga

*Chlorella vulgaris* utilizando un producto comercial durante un periodo de 5 días, mediante una dosificación inicial el primer día y otra diaria en los siguientes cuatro días, con la finalidad de conocer, mediante los análisis de agua antes y después del proceso, si el uso de *Chlorella vulgaris* arrojaba resultados positivos en la reducción de la concentración de los parámetros físicos y químicos.

## II. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo General

- Evaluar la aplicación de la microalga *Chlorella vulgaris* en el tratamiento del agua residual.

### 2.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de *Chlorella vulgaris* sobre los siguientes parámetros físicos del agua residual tratada: sólidos suspendidos totales, sólidos volátiles, olor y color.

- Evaluar el efecto de *Chlorella vulgaris* sobre los siguientes parámetros químicos del agua residual tratada: grasas y aceites, demanda bioquímica de oxígeno, nitrógeno total, acidez, potencial Hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica.

### III. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 3.1 Calidad del agua

El origen de la contaminación es variado pero se pueden citar como causantes a: desechos urbanos e industriales, drenados de la agricultura, actividades mineras, erosión, derrames de sustancias tóxicas (accidentales e intencionales), efluentes de plantas depuradoras, subproductos de los procesos de depuración, rupturas de drenaje y lavado de la atmósfera, entre otros. No hay duda de que el agua no solo disuelve, sino además arrastra y emulsiona a gran número de compuestos con los que entra en contacto a lo largo de su ciclo y que modifican su calidad. El agua a diferencia del aire, tiene una composición precisa ( $H_2O$ ) y por lo tanto, es fácil identificar los compuestos ajenos a ella. Sin embargo, la definición de cuáles son sus contaminantes es difícil.

Es un hecho que el agua rara vez se encuentra en forma pura y afortunadamente, para fines prácticos no se le requiere así o no importa el que contenga otros compuestos; todo depende de su uso (Jiménez, 2002).

#### 3.2 Agua disponible

Se calcula que en la tierra existen aproximadamente 1, 385,000,000  $km^3$  de agua, de los cuales el 97.3 % es salada, el 2.08 % se encuentra congelada en los polos y solo una pequeña parte esta efectivamente disponible para las necesidades humanas (Arellano, 2002; Jiménez, 2002).

La renovación natural del recurso se realiza a través del ciclo hidrológico. Por precipitación cae 28 % del agua en la tierra y el 72 % en el mar. Del agua que cae en la tierra 7 % se percola e a los acuíferos, 8

% va al mar por escurrimiento y el 13 % restante, regresa a la atmósfera por evaporación (de los cuerpos de agua superficiales) y evapotranspiración (de la cubierta vegetal). Solo el 7 % del agua de lluvia se recupera en los diversos cuerpos de agua para su posible empleo como agua dulce, mientras que el 93 % se pierde por medios físicos o biológicos (evapotranspiración) (Jiménez, 2002).

### **3.2.1 Consumo de agua a nivel mundial**

A nivel mundial el consumo municipal abarca entre 8 y 9 % de este consumo; la industria consume entre 20 y 30 %, en tanto que la agricultura utiliza entre 60 y 70 % del consumo mundial del agua (Torres, 2005).

### **3.2.2 El agua en México**

El 67 % del territorio mexicano es árido o semiárido y solamente el 33% es húmedo o sub húmedo. La precipitación media anual es de 777 mm, de los cuales cerca del 27 % se transforma en un escurrimiento de 13,000 m<sup>3</sup> /s, con una parte no recuperable de aproximadamente 3,488 m<sup>3</sup>/s. Al igual que en el resto del mundo, la distribución es muy irregular y se concentra principalmente en el sur en las cuencas de los ríos Grijalva - Usumacinta, Papaloapan, Pánuco y Balsas durante pocos meses. En el norte y altiplano central (regiones que representan más de la mitad del territorio nacional) se registra casi el 20 % del escurrimiento medio anual y es allí donde se encuentran el 76 % de la población, 70 % de la industria, 77 % del PIB y 90 % del riego para las zonas agrícolas. Así, aún cuando el balance global del país es positivo, los balances regionales en casi la mitad del territorio muestran un déficit considerable, tal es el caso de las regiones de Baja California, Bravo, Comarca Lagunera,

Jerma y el valle de México (CNA, 2002; CNA, 2003; Jiménez, 2002; Ortiz *et al*, 2002).

### **3.2.3 Uso del agua en México**

De acuerdo con la comisión nacional del agua (CNA), la extracción del agua en México alcanza cerca de 186.4 km<sup>3</sup> por año (5,920 m<sup>3</sup>/s), esto es, 45 % de la precipitación del país. La generación hidroeléctrica demanda el mayor volumen de extracción (60 %) mientras que la irrigación es 80 % del consumo. Cabe mencionar que México ocupa el séptimo lugar mundial en áreas irrigadas (6 de las 21 millones de hectáreas son de riego). En uso municipal, el 83.5 % de la población cuenta con servicios de agua potable y 67 % con alcantarillado (CNA, 2003; Jiménez, 2002).

El empleo de acuíferos representa el 27 % de la extracción total y es muy notorio que el sector que mas la emplea es el riego (76 % del total). Normalmente, este tipo de agua es considerado de alta calidad y se prefiere preservar para el consumo humano, principalmente porque el uso del agua para riego tiene eficiencia muy baja (del orden del 50 %) (Jiménez, 2002).

### **3.3 Escasez del Agua**

Según la organización mundial de la salud (OMS), la escasez cada vez mayor de agua dulce debido al crecimiento demográfico, urbanización y probablemente, a los cambios climáticos, ha dado lugar al uso creciente de agua residual para la agricultura, acuicultura, recarga de aguas subterráneas y otras áreas. Si bien el reuso de agua residual tratada puede aportar beneficios, su uso no controlado generalmente está relacionado con impactos significativos sobre la salud humana. Estos

impactos en la salud se pueden minimizar cuando se implementan buenas prácticas de manejo (OMS, 2005).

### **3.3.1 Reutilización del agua residual tratada**

Se entiende por reutilización el uso del agua, después del consumo por el hombre ya sea para satisfacer sus necesidades directas o sus requerimientos indirectos. En la reutilización del agua es conveniente tener en cuenta los riesgos que ocasionaría para la salud, los beneficios, la aceptación de la sociedad y la garantía de un tratamiento adecuado, caso contrario, los problemas que genera el vertido directo del agua residual a los cauces receptores son marcados y repercuten en la salud humana y disponibilidad de agua, calidad de suelos, etc. (Torres, 2005).

El reuso del agua residual depende de la normativa vigente en cada país, pero como se ha mencionado, el uso del agua residual doméstica tratada no ha demostrado problemas posteriores al reuso (Scott *et al*, 2004; Torres, 2005)

El agua residual tratada puede utilizarse en el sector agrícola; es una práctica con más de cien años de vigencia, la cual se ha visto con renovada atención en las últimas décadas, debido a la creciente escasez de fuentes de agua en muchos países con zonas áridas y semiáridas; en riego de parques, jardines, zonas viales, campos deportivos de recreación; en uso Industrial (refrigeración, calderas, diferentes fases del proceso); recarga de acuíferos; mantenimiento de lagos, estanques, ríos, así como uso doméstico (no potable) (Scott *et al*, 2004; Torres, 2005).

### **3.3.2 Reutilización del agua residual en México**

El uso de agua residual urbana tratada para satisfacer las necesidades de los servicios municipales es una práctica que se ha desarrollado en los últimos años en diversas partes del mundo donde se

presenta una marcada escasez de aguas de otras fuentes. Esta práctica se realiza en países como Sudáfrica, Arabia Saudita, Paquistán, así como en Estados Unidos en los estados de Arizona, California, Nuevo México y Texas. Esto es apoyado por una campaña para crear conciencia en la población y por una legislación propicia que asegure una adecuada calidad para el uso del agua. La reutilización del agua se constituye como una alternativa de gran relevancia en las zonas áridas y semiáridas del país. Actualmente es aprovechada en el riego agrícola el agua cruda de origen municipal en los Valles del Yaqui, Mayo y Guaymas en Sonora, Chiconautla en el Estado de México, Tula, Alfajayucan y Tulancingo en Hidalgo, Valle de Juárez en Chihuahua y Valsequillo en Puebla, entre otros.

De igual forma, el uso del agua residual tratada en la planta industrial mexicana tiene dos vertientes: una es la toma del agua residual tratada municipal y la otra se refiere a la reutilización del agua generada por la propia industria. Existen ejemplos en la Comisión Federal de Electricidad, PEMEX y Altos Hornos de México, que recurren a la primera alternativa; la otra alternativa es utilizada principalmente por industrias termoeléctricas, de celulosa y papel, química, acerera y petroquímica, que la utilizan principalmente dentro de sus procesos, sistemas de enfriamiento o calderas. El aprovechamiento del agua residual, en forma ordenada y de acuerdo a la normatividad, puede permitir satisfacer requerimientos de agua en usos que no exijan calidad potable, principalmente en zonas de gran escasez o conflicto por el uso de la misma. Actualmente se reutiliza agua residual con o sin tratamiento de la forma siguiente: 2.4 km<sup>3</sup>/ año en riego agrícola, 0.2 km<sup>3</sup>/año por la industria y 0.3 km<sup>3</sup>/año en uso público (CNA, 2003).

Así mismo, el agua puede ser recuperada, reciclada y reusada dentro de las instalaciones de las instituciones educativas. Se incrementa el valor agregado del agua por la obtención de productos comerciales y el fomento de la filosofía del uso eficiente del agua (Vigueras *et al*, 2003).

### **3.3.3 Agua potable, alcantarillado y tratamiento del agua residual en México**

En México existen 201,138 localidades, de las cuales el 98.6 % son rurales (menos de 2,500 habitantes) y sólo el 1.4 % son urbanas (más de 2,500 habitantes). No obstante el gran número de localidades rurales, el 72.8 % de la población se ubica en localidades urbanas; destaca que el 50.7 % de la población se ubica en las 169 grandes ciudades del país (CNA, 2003).

Las primeras plantas de tratamiento del agua residual en México se construyeron en la segunda mitad del siglo XX (Jiménez, 2002).

En materia de tratamiento del agua residual, hasta diciembre de 1999 se tienen en inventario 1,000 sistemas municipales con una capacidad instalada de 67.5 m<sup>3</sup>/s, de los cuales 777 se encuentran en operación con un caudal tratado de 42.4 m<sup>3</sup>/s, pero solamente 29 m<sup>3</sup>/s (12 % del caudal generado) cumple con la normatividad vigente. Mediante sistemas de alcantarillado se recolectan 187 m<sup>3</sup>/s, por lo que 22 % del agua residual procedente de localidades urbanas a nivel nacional reciben tratamiento. Los procesos de tratamiento para los efluentes municipales son diversos aunque predominan las lagunas de estabilización y lodos activados (CNA, 2003).

### **3.4 Porcentaje de procesos de tratamiento en efluentes municipales (Porcentaje utilizado en las plantas de tratamiento)**

En México, el tratamiento de efluentes municipales se lleva a cabo por varios procesos, los cuales son, filtros biológicos, con 3 % del total de las plantas tratadoras; lagunas aeradas, con 1 % del total; lodos activados, con 20%; tratamiento primario, con 1 %; zanjas de oxidación, con 2 %; lagunas de estabilización, con 54 % y otros métodos, 19 %.

De los datos anteriores, puede notarse que el método mas utilizado en el país para tratamiento de efluentes municipales es el de lagunas de estabilización, con un 54 % (CNA, 2003).

### **3.4.1 Tendencia actual de las necesidades de tratamiento del agua residual en México.**

En México se requieren entre 100 y 200 plantas pequeñas para el tratamiento de agua residual industrial y municipal por año (González, 2005).

### **3.5 Contaminación del agua**

La contaminación del agua se define como la presencia de sustancias u organismos extraños en un cuerpo de agua en tal cantidad y con características que impiden su utilización, tanto para los seres humanos, como para el resto de los organismos. La contaminación puede ser antropogénica o natural. Sin embargo, existen dos tipos de tratamientos de agua: el tratamiento de agua para su acondicionamiento al consumo humano, ya que el agua tal y como se encuentra en la naturaleza no puede ser utilizada por el hombre, dado que puede contener sustancias que provocan daños a la salud y el tratamiento de agua residual, que se aboca a disminuir la gran cantidad de contaminantes del agua una vez que fue utilizada por el hombre para actividades agrícolas, industriales o domésticas. Ambos tratamientos tienen los mismos principios, pero el tratamiento de agua residual es mas complejo debido a la cantidad de contaminantes (Arellano, 2002).

### **3.5.1 Contaminantes convencionales del agua**

Estos pueden ser físicos, que afectan el color, olor, sabor, temperatura, turbiedad, sólidos y conductividad eléctrica; químicos (la alcalinidad, oxígeno disuelto, pH, no metales, nutrientes como nitrógeno y fósforo, dureza y cloro residual), materia orgánica (la demanda bioquímica de oxígeno, carbono orgánico total, grasas y fenoles, etc.) y biológicos, que a su vez se dividen en bacteriológicos (Coliformes fecales y en otros microorganismos como *Vibrio cholerae*, *Shigella*, *Salmonella*, *Giardia*, etc.) (Jiménez, 2002).

## **3.6 Clasificación de los compuestos presentes en el agua de acuerdo con su naturaleza**

### **3.6.1 Físicos**

Son alteraciones de las propiedades físicas del agua, tales como la temperatura, color, etc. Su origen y efectos son diversos (Jiménez, 2002).

### **3.6.2 Químicos**

Los compuestos químicos provienen de los drenados de minas, desechos solubilizados de la agricultura, derrames de petróleo, pesticidas, aguas residuales municipales, desechos líquidos industriales y compuestos radiactivos. Producen efectos diversos y pueden ser de origen natural o sintético. Algunos son desechados directamente, otros, se forman por la reacción entre diferentes compuestos en el agua y por último, una pequeña fracción se forma durante el procesamiento del agua. Entre estos últimos se encuentran los organoclorados (tetracloruro de carbono y cloroformo, principalmente) que se forman durante la desinfección del agua con cloro (Jiménez, 2002).

### 3.6.3 Biológicos

Son seres vivos que provocan enfermedades en el hombre u otras especies. Las más comunes en el hombre son la tifoidea, salmonelosis, disentería, cólera y helmintiasis. Los agentes que las causan entran al agua a través de las heces fecales de humanos o animales. Para tener una idea de la magnitud de este problema, se estima que el 80 % de todas las enfermedades y más de la tercera parte de los fallecimientos en países en vía de desarrollo, se debe al consumo de agua contaminada (Jiménez, 2002).

### 3.7 Agua Residual

El agua residual es fundamentalmente aquella agua de abastecimiento de una población, después de haber sido impurificada por diversos usos; líquido turbio que contiene material sólido en suspensión; agua de composición variada proveniente de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas, que también impliquen una alteración de su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica. (Fair *et al*, 1986; SEMARNAT, 2005; Torres; 2005).

Cuando es fresca, su color es gris y tiene un olor a moho no desagradable. Flotan en ella cantidades variables de materia: sustancias fecales, basura, papeles y otros muchos tipos de residuos. Con el transcurso del tiempo, el color cambia a negro, desarrollándose un olor ofensivo y desagradable; aparecen sólidos negros flotando en la superficie o en todo el líquido. En este estado, se denomina agua negra séptica (Fair *et al*, 1986).

### 3.7.1 Constituyentes del Agua Residual

Los constituyentes encontrados en el agua residual pueden ser clasificados como físicos, químicos y biológicos. Antes de considerar las características físicas, químicas y biológicas del agua residual, es conveniente tratar brevemente los procedimientos analíticos usados para la caracterización del agua residual (Crites y Tchobanoglous, 2000).

### 3.7.2 Composición del agua residual urbana

Parte de las sustancias contenidas en los fluidos del alcantarillado doméstico están disueltas y parte suspendidas. Hay compuestos de nitrógeno (de origen metabólico) y fósforo (la mitad provenientes o procedentes del metabolismo humano y la otra mitad proveniente de los polifosfatos de sodio contenidos en los detergentes de uso doméstico) (Bettini, 1998).

### 3.7.3 Tipo de agua residual

**Agua residual doméstica:** es la que contiene desechos humanos, animales y caseros. Son típicas de las áreas habitacionales en las que no se efectúan operaciones industriales o en muy corta escala.

**Agua residual sanitaria:** Incluye el agua doméstica y gran parte o la totalidad de los desechos industriales de la población.

**Agua residual industrial:** es una mezcla del agua doméstica o sanitaria y la pluvial, cuando se colectan en las mismas alcantarillas.

**Desecho industrial:** es el agua de desecho proveniente de los procesos industriales. Pueden colectarse o pueden agregarse y formar parte del agua negra sanitaria o combinadas (Fair *et al*, 1986; Torres, 2005).

### **3.7.4 Fuentes de agua residual**

El drenaje sanitario es el abastecimiento de agua desechada por la comunidad y el drenaje doméstico es el agua residual procedente de cocinas, baños, sanitarios y lavanderías. A las materias minerales orgánicas originalmente contenidas en el agua suministrada a la comunidad, se agrega un cúmulo de materias fecales, papel, jabón, suciedad, restos de alimento, basura y sustancias en general. Ciertos residuos permanecen en suspensión, algunos entran en solución y otros se encuentran tan finamente divididos que adquieren propiedades coloidales. Gran parte de la materia residual es orgánica y útil para los microorganismos saprófitos, es decir, aquellos que se alimentan de lo que descomponen. Se infiere que el drenaje doméstico es inestable, biológicamente degradable o putrescible y capaz de originar olores ofensivos. Debe suponerse que se encuentran presentes organismos entéricos en el agua negra doméstica, que la hacen peligrosa (Fair *et al*, 1986).

### **3.7.5 Composición típica del agua de alcantarillado doméstico**

De acuerdo al programa de las naciones unidas para el medio ambiente de la Organización de las Naciones Unidas (PNUMA), el agua de alcantarillado de uso domestico contiene de 200 a 300 mg / L de sólidos suspendidos totales, de 200 a 250 mg / L de demanda bioquímica de oxígeno, de 350 a 450 mg / L de demanda química de oxígeno, de 25 a 60 mg / L de fósforo total y de 80 a 120 mg / L de grasas y aceites, concentraciones que rebasan los límites máximos permisibles contenidos en las normas oficiales mexicanas (PNUMA, 2003; SEMARNAT (1y2), 2005).

### 3.8 Descargas residuales

Para determinar una descarga de agua residual son necesarios dos aspectos, calidad y cantidad. En México no hay valores guías de producción, por lo tanto, se acostumbra calcular a partir de la dotación y de un factor de captación que varía entre 0.65 y 0.75. En general, se estima que se producen entre 100 y 350 L / habitante / día. La incertidumbre es aún mayor cuando la red de drenaje es combinada, es decir, que además del agua de desecho conduce agua de lluvia (Jiménez, 2002).

#### 3.8.1 Calidad de las descargas

La calidad de las descargas depende de su origen y se distinguen tres tipos: puntuales, accidentales y dispersas. Se considera que las fuentes puntuales son más fáciles de controlar debido a que se conoce su localización y por lo tanto, se facilita su muestreo, cuantificación y análisis. Generalmente, estas se generan en la industria o en los municipios. Las dispersas en cambio, son de difícil control y provienen de retornos agrícolas, silvícolas, lixiviados de residuos y desechos sólidos, erosión, drenado de minas, lavado de la contaminación atmosférica, falta de drenaje, fugas y fosas sépticas. Por último, las descargas accidentales son casi imposibles de cuantificar, pues ocurren aleatoriamente, por ejemplo, los accidentes industriales y derrames (Jiménez, 2002).

#### 3.8.2 Agua cruda y agua tratada

Es necesario hacer distinción entre estos dos estados del agua residual. **Agua cruda** es el agua residual sin tratamiento, en tanto que **Agua residual tratada** es aquella que mediante procesos individuales o combinados de tipo físicos, químicos, biológicos u otros, se han

adecuado para hacerla apta para su reuso en servicios al público (SEMARNAT, 2005 (2)).

### **3.9 Composición física del agua residual**

Entre las propiedades físicas se encuentran el color, olor, sabor, temperatura, turbiedad, conductividad eléctrica y contenido de sólidos (Jiménez, 2002).

#### **3.9.1 Color**

El color verdadero se define como el que se produce por sustancias disueltas y se aplica para el agua potable. El color aparente está dado por los sólidos en suspensión más el color verdadero de la muestra (Jiménez, 2002).

#### **3.9.2 Olor**

Es un parámetro que proporciona información sobre el estado del agua y puede provocar rechazo por parte de la población. En lo concerniente al agua residual, esta tiene un olor muy diferente, tratándose de agua residual fresca, en estado de descomposición o estabilizada.

El olor se describe mediante las siguientes características:

*Carácter:* con que lo asocia un sujeto.

*Detectabilidad:* a que dilución con aire puro ya no es perceptible

*Apestableidad:* que tan desagradable es.

*Intensidad:* que tan fuerte es.

El olor es evaluado por personas y no con aparatos, por lo tanto, los resultados son subjetivos, ya que es posible que el sentido del olfato se adapte después de una exposición prolongada. Además, es muy difícil

colectar y preservar muestras (Crites y Tchobanoglous, 2000; Jiménez, 2002).

Entre los principales compuestos que causan mal olor en el agua residual y lodos se encuentran el ácido sulfúrico, acetaldehído, amil mercaptano, aminas, amoníaco, bencil mercaptano, escatol, diamidas, indol, sulfuros orgánicos, tiocersol, tiofenol, etc. (Jiménez, 2002).

### **3.9.3 Sabor**

Se origina por la presencia de minerales (metales y sales del suelo) o por productos finales de las reacciones biológicas. Los compuestos inorgánicos generalmente producen sabor pero no olor, en cambio, los orgánicos producen ambos. El sabor es un parámetro del agua potable medido por catadores (Jiménez, 2002).

### **3.9.4 Temperatura**

Influye sobre la tasa de crecimiento biológico, las reacciones químicas, solubilidad de los contaminantes o compuestos requeridos (sólidos, líquidos o gases; principalmente O<sub>2</sub>) y en el desarrollo de la vida. La temperatura no tiene efectos directos en la salud. No obstante, una mayor temperatura (alrededor de 40 °C) favorece el desarrollo de microorganismos y acrecienta los problemas de sabor, olor y corrosión (Jiménez, 2002).

### **3.9.5 Turbiedad**

Es el parámetro que mide que tanto es absorbida o dispersada la luz por la materia suspendida (sedimentable y coloidal) del agua. La turbiedad no es un análisis cuantitativo de los sólidos suspendidos. En aguas superficiales, se debe en gran parte a la presencia de arcilla y

otros minerales, cuyos tamaños son del orden de 0.2 a 0.5  $\mu\text{M}$ , es decir, incluyen sólidos de escala superior a los verdaderos coloides. La turbiedad ocasionada por material coloidal puede ser resultado de la presencia de detergentes en el agua, jabones y emulsificadores. La necesidad de contar con mediciones más precisas propició que se desarrollaran los métodos nefelométricos (basados en la medición de luz que es dispersada en un ángulo de  $90^\circ$  al atravesar una muestra), como dichas mediciones no emplean el mismo principio que el turbidímetro Jackson (paso de luz en línea recta), no existe relación entre las unidades técnicas de Nefelometría (UTN) y las Unidades Técnicas Jackson (UTJ). Las unidades que se emplean con mayor frecuencia son las UTN, aun cuando no existe una unidad universal para medirla. En México, se toman lecturas indistintamente en UTN o UTJ y es frecuente que se piense que son equivalentes (Jiménez, 2002).

### **3.9.6 Sólidos**

Son todo residuo que queda después de la evaporación (a  $103^\circ\text{C}$ ), se clasifican en sólidos disueltos y sólidos no disueltos, estos últimos a su vez se clasifican en aquellos que flotan y aquellos que sedimentan y a su vez estos últimos se clasifican en los que sedimentan rápidamente o muy lentamente (coloides) (Jiménez, 2002).

### **3.10 Tamaño de partículas presentes en el agua residual**

Las partículas suspendidas o no filtrables son menores a  $1\ \mu$ , las coloidales miden de  $10^{-3}$  a  $1\ \mu$ , las disueltas son menores de  $10^{-3}\ \mu$ , las sedimentables son mayores de  $10\ \mu$  y las eliminables por coagulación miden de  $10^{-3}$  a  $10\ \mu$  (Jiménez, 2002; Serrano, 1997).

### **3.11 Parámetros que determinan la calidad del agua residual**

#### **3.11.1 Conductividad eléctrica**

Este parámetro mide la concentración de la salinidad; representa la capacidad de una solución para transmitir una corriente eléctrica. Su valor depende del tipo de iones involucrados, concentraciones, estado de oxidación de los mismos, así como la concentración relativa de cada uno y la temperatura. La conductividad del agua residual depende de la fuente de abastecimiento y solo algunos procesos industriales la modifican significativamente (Jiménez, 2002; Serrano, 1997).

#### **3.11.2 Materia orgánica**

Los compuestos orgánicos como parámetro de calidad, se clasifican en general, en dos categorías: biodegradables o no biodegradables. La materia biodegradable es alimento para los microorganismos, puede estar en forma de carbohidratos, grasas, proteínas, alcoholes, ácidos, aldehídos, ésteres, así como algunos productos finales de la descomposición microbiana, en tanto que la materia no biodegradable son generalmente sustancias cuya estructura química las hace difícil de degradar o bien, degradarse muy lentamente, siendo los compuestos mas comunes de este tipo las grasas y aceites. Los compuestos orgánicos están formados por una combinación de Carbono, Hidrógeno y Oxígeno, junto con nitrógeno en algunos casos. En agua residual doméstica, 75% de los sólidos suspendidos y 40% de los sólidos filtrables son de naturaleza orgánica. Los principales grupos presentes son las proteínas (40 a 60%), carbohidratos (25 – 50%) y grasas y aceites (10%) (Jiménez, 2002; Seoanez, 1993).

Dentro de la materia orgánica se encuentran también compuestos químicos recalcitrantes tales como Bifenilos policlorados (PCB),

tetracloroetileno, etano, tetracloruro de carbono, así como también, herbicidas como el Dinoseb, entre otros (Levin y Gealt; 1997).

### **3.11.3 Grasas y aceites**

La grasa animal y los aceites son ésteres compuestos de alcohol o glicerol (glicerina) y ácidos grasos. Los ésteres de ácidos grasos, que son líquidos a temperaturas ordinarias, se llaman aceites y los que son sólidos se llaman grasas. Ambos son químicamente muy semejantes, ya que se componen de carbono, hidrógeno y oxígeno en diversas proporciones. Las grasas son de los compuestos orgánicos más estables y no se descomponen fácilmente por la acción de las bacterias. Si la grasa no se elimina antes de la descarga del agua residual, puede interferir con la vida biológica acuática y crear películas y materiales en flotación imperceptibles (Jiménez, 2002).

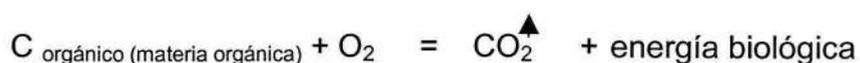
Los límites de 15 a 20 mg / L de contenido de grasa y la ausencia de capas de aceites iridiscentes son dos ejemplos de normas establecidas. Las grasas pueden inhibir el tratamiento biológico del agua (Jiménez, 2002; Serrano, 1997).

### **3.11.4 Materia inorgánica**

Según el departamento de sanidad del estado de Nueva York (D.S.E.N.Y., 2004), es la materia constituida por compuestos constituidos por azufre, fósforo y hierro. Pueden ser sustancias inertes no sujetas a la degradación, tales como la arena, grava, cieno y sales minerales procedentes del abastecimiento de agua que producen su dureza y contenido mineral (D.S.E.N.Y., 2004).

### 3.11.5 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Un parámetro esencial para definir el grado de contaminación de un volumen de agua es la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), es decir, la cantidad de oxígeno expresada en mg / L o g / m<sup>3</sup>, que deben consumir los microorganismos aerobios existentes en el medio para metabolizar o degradar la materia orgánica biodegradable contenida en el agua en 5 días a una temperatura de 20° C y transformarla en anhídrido carbónico:



Solo evalúa la demanda ejercida por la fracción carbonada, la de sulfuros y ion ferroso; excluye la fracción nitrogenada. La DBO no mide un compuesto en especial, sino todos los biodegradables por vía aerobia; se expresa en mg O<sub>2</sub> / L (Bettini, 1998; Jiménez, 2002; Serrano, 1997).

En la actualidad, existen varios métodos para detectar la DBO, desde diluciones hasta técnicas respirométricas. El agua de calidad potable tiene una DBO promedio mensual del orden de 0.75 a 1.5 mg O<sub>2</sub> / L; el agua residual doméstica oscila entre 200 a 300 mg O<sub>2</sub> / L y algunos efluentes industriales pueden alcanzar hasta 20 g / L (Jiménez, 2002; Winkler, 1985).

La DBO se practica tanto en una muestra que contiene sólidos (total) como solo en la fracción filtrable (soluble). La DBO tiene sensibilidad máxima de 2 mg / L, por ello no es considerada como prueba de alta precisión. Por este motivo, aunado a la tardanza del método, cada día se emplea menos. La DBO es una reacción de 1er orden que representa la cantidad de materia orgánica utilizada por los microorganismos, y puede expresarse como:

$$DLt / dt = - KLt$$

*Donde:*

D = oxígeno disuelto en el volumen de agua (mg/L)

Lt = Oxígeno equivalente a la materia orgánica en el tiempo (t)

K = tasa de consumo de Oxígeno que es específica para cada tipo de sustrato (Crites y Tchobanoglous, 2000; Jiménez, 2002; Serrano, 1997).

La DBO es importante para el tratamiento del agua residual; los resultados de la DBO se utilizan para determinar la cantidad aproximada de O<sub>2</sub> que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente, en el diseño de las instalaciones de tratamiento de agua residual y medir la eficiencia de algunos procesos de tratamiento (Bettini, 1998; Jiménez, 2002).

### **3.11.6 Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

La DQO es una medida de la concentración de sustancias que en el agua pueden ser atacadas por un oxidante fuerte (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) en altas temperaturas (350° C). Esta característica es muy semejante a la DBO, pero difiere en que la DQO es una medida indirecta de la cantidad de oxígeno necesario para oxidar tanto biológica como químicamente los compuestos presentes en el agua residual. La DQO no guarda relación con la DBO, aunque generalmente es mayor. Esta prueba, aunque es mucho más rápida de realizar que la DBO, toma aproximadamente 3 horas en el laboratorio, se opta por técnicas más veloces, como la del Carbono Orgánico Total (COT) que solo requiere algunos minutos para su determinación (Jiménez, 2002; Serrano, 1997).

Sin embargo, debido al costo del aparato para determinar COT, en los países en vías de desarrollo se continúan realizando, con frecuencia tanto la DBO como la DQO para análisis de rutina (Jiménez, 2002).

La determinación de este parámetro adquiere importancia debido a los múltiples compuestos químicos que el agua residual contiene.

Actualmente, puede tomarse como un parámetro mas confiable para el diseño y operación de plantas tratadoras de agua residual (Serrano, 1997).

### **3.11.7 Carbono Orgánico Total (COT)**

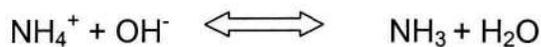
El carbono en la materia orgánica se encuentra en varios estados de oxidación que reaccionan de manera diferente a la prueba de DBO o de DQO. En efecto, la DQO y la DBO dependen del estado de oxidación de la materia orgánica; en cambio, el COT evalúa el contenido total de carbono en su forma orgánica (Jiménez, 2002; Serrano, 1997).

La medición se hace por combustión del carbono orgánico y su transformación en  $\text{CO}_2$ , el cual formado, es detectado mediante infrarrojo. Se puede medir el carbono total si se incluye el carbono inorgánico y al carbono orgánico total, tanto en la fracción disuelta como en la fracción soluble. Es importante resaltar que estos parámetros no miden lo mismo, por lo que las relaciones establecidas entre la DBO, la DQO y el COT son empíricas y solo válidas para la misma matriz de análisis, por ejemplo, en un sistema de tratamiento la correlación sirve únicamente para un sitio de muestreo (influyente) pero no en diferentes (influyente y efluente) (Jiménez, 2002; Serrano, 1997)

### **3.11.8 Nitrógeno**

Dado que el N y P son esenciales para el crecimiento biológico, reciben el nombre de nutrientes o bioestimulantes. Debido a que el nitrógeno es esencial para la síntesis de proteínas, se necesitan conocer datos sobre la presencia de este nutriente al momento de evaluar la tratabilidad del agua residual mediante procesos biológicos. Por ello su

importancia radica en que es un elemento necesario para los microorganismos presentes en el tratamiento de agua residual. En caso de que la concentración de nitrógeno sea insuficiente será necesario adicionarlo para lograr que el agua residual sea tratable. El contenido total de Nitrógeno está compuesto por nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos y nitrógeno orgánico. El nitrógeno amoniacal existe en solución acuosa tanto en forma de ion amonio como en forma de amoniaco, dependiendo del pH de la solución, de acuerdo a la siguiente reacción de equilibrio:



El nitrógeno en forma de nitrito, determinado por medios colorimétricos, es bastante inestable y fácilmente oxidado a la forma de nitrato. El nitrógeno en forma de nitrato, la especie química del nitrógeno mas oxidada que se encuentra en agua residual, se determina de la misma forma. La concentración de nitratos en agua residual tratada puede variar de 2 a 30 mg/L como nitrógeno, dependiendo del grado de nitrificación y desnitrificación del tratamiento (Crites y Tchobanoglous, 2000).

El nitrógeno orgánico se determina por el método de Kjeldahl, en el cual una muestra acuosa es primero hervida para eliminar el amoniaco y posteriormente se realiza una digestión por ebullición en ácido sulfúrico.

El nitrógeno orgánico presente en la muestra se convierte en amoniaco para ser luego destilado y medido por Nesslerización. El nitrógeno total Kjeldahl se determina del mismo modo que el nitrógeno orgánico, con la diferencia de que no se elimina el amoniaco antes de la etapa de digestión. Por lo tanto, el Nitrógeno Total Kjeldahl incluye el nitrógeno orgánico y el nitrógeno amoniacal (Crites y Tchobanoglous, 2000).

## 3.12 Utilidad de los constituyentes encontrados en el agua residual con respecto a sus características físicas, químicas y biológicas

### 3.12.1 Características físicas

- **Sólidos totales:** determinan la clase de proceso u operación más apropiada para su tratamiento.

- **Sólidos volátiles totales; fijos totales; suspendidos totales, volátiles y fijos; disueltos totales, volátiles y fijos totales; y sólidos sedimentales:** Estiman la reutilización del agua residual.

- **Sólidos volátiles y fijos totales; y sólidos sedimentales:** determinan aquellos sólidos que se sedimentan por gravedad en un tiempo específico.

- **Sólidos sedimentables y distribución de partículas por tamaño:** evalúan el desempeño de los procesos de tratamiento.

- **Turbiedad:** evalúa la calidad del agua tratada.

- **Color:** estiman la condición del agua residual (fresca o séptica).

- **Transmitancia:** estiman si el efluente tratado es apropiado para la desinfección con radiación UV.

- **Olor:** determinan si esta característica puede ser un problema.

- **Temperatura:** importante en el diseño y operación de las instalaciones con procesos biológicos.

- **Densidad y conductividad eléctrica:** estiman si el efluente tratado es apto para uso agrícola (Crites y Tchobanoglous, 2000; Jiménez, 2002; Serrano, 1997).

### 3.12.2 Características químicas inorgánicas

- **Amonio libre, nitrógeno orgánico, nitrógeno total Kjeldahl, nitritos, nitratos y fósforo inorgánico:** estiman la medida de nutrientes presentes y el grado de descomposición de las aguas residuales.

- **Fósforo orgánico:** usado como medida de nutrientes.

- **pH:** medida de la acidez o basicidad de una solución acuosa.

- **Alcalinidad:** medida de la capacidad amortiguadora del agua residual.

- **Cloruros:** evalúa la capacidad de su uso en riego agrícola.

- **Sulfatos:** estiman la formación potencial de olores y tratamiento apropiado de lodos residuales.

- **Metales (As, Cd, Ca, Cr, Co, Cu, Pb, Mg, Hg, Mo, Ni, Se, Na y Zn):** Estiman la posibilidad de reutilizar el agua residual y los posibles efectos tóxicos en el tratamiento. Las cantidades de metales son importantes en el tratamiento biológico (Crites y Tchobanoglous, 2000; Jiménez, 2002; Serrano, 1997).

### 3.12.3 Características químicas orgánicas

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno:** conocer la cantidad de oxígeno necesario para los microorganismos aerobios para degradar los compuestos presentes en agua residual en 5 días a una temperatura de 20 °C.

- **Demanda Química de Oxígeno:** es una medida de la concentración de sustancias que en el agua pueden ser atacadas por un oxidante fuerte en altas temperaturas.

- **Carbono Orgánico Total:** evalúa el contenido total de carbono en su forma orgánica (Crites y Tchobanoglous, 2000; Jiménez, 2002; Serrano, 1997).

#### **3.12.4 Características biológicas**

- **Organismos coliformes:** Estiman la presencia de bacterias patógenas y determinar la eficiencia de desinfección. Se cuantifican por número más probable (NMP).

- **Microorganismos específicos:** estiman la presencia de bacterias, helmintos, protozoarios o virus con la operación de la planta de tratamiento (Crites y Tchobanoglous, 2000; Jiménez, 2002; Serrano, 1997).

### **3.13 Principales constituyentes de interés en el tratamiento del agua residual**

Los sólidos suspendidos totales son importantes en el tratamiento del agua residual debido a la formación de lodos y condiciones anaerobias. Los compuestos orgánicos biodegradables son importantes debido a que agotan el oxígeno en fuentes naturales y propician el desarrollo de condiciones sépticas. Los metales pesados constituyen contaminantes de prioridad debido a su efecto en la salud humana. Los nutrientes propician el crecimiento excesivo de la vida acuática, eutroficación y la acumulación de nitratos en el agua para consumo humano. Por su parte, los patógenos causan la transmisión de enfermedades (Crites y Tchobanoglous, 2000).

### **3.14 Parámetros biológicos**

El análisis para la evaluación de la calidad biológica del agua consiste generalmente en la determinación de indicadores bacteriológicos y no de organismos patógenos como tales. Tradicionalmente, los grupos de bacterias considerados como indicadores, son los coliformes totales y los fecales. El indicador ideal es el que se encuentra presente cuando existen bacterias patógenas de origen fecal y cuyo número está relacionado directamente con el grado de contaminación. El indicador tradicional de la calidad microbiológica son las bacterias del grupo de los coliformes fecales, especialmente *Escherichia coli*. Los coliformes fecales están estrictamente relacionados con la probabilidad de encontrar patógenos excretados, mientras que los miembros del grupo coliforme total están ampliamente distribuidos en la naturaleza, en comparación con su presencia en el intestino humano y en el de animales de sangre caliente, presenta poco significado sanitario en agua residual (Jiménez, 2002).

#### **3.14.1 Contaminantes microbiológicos**

En términos estrictos, cualquier organismo viviente en el agua, constituye un parámetro biológico y obviamente no se puede decir todos son contaminantes. Sin embargo, debido a su función dentro de las cadenas tróficas, tienen fundamental importancia (Jiménez, 2002).

#### **3.14.2 Tipo de microorganismos presentes en el agua residual**

##### **Virus:**

Es la estructura viva más pequeña que contiene toda la información genética necesaria para su reproducción. En cuanto a los virus de interés en el agua, únicamente importan aquellos que se reproducen en el

intestino y que son desechados en grandes cantidades con las heces fecales.

### **Bacterias:**

Son la forma de vida más pequeña (una célula) capaz de sintetizar el protoplasma de su ambiente. Algunas de las bacterias son causantes de problemas gastrointestinales, cólera, tifoidea y salmonelosis. Otras se emplean para la depuración del agua en los procesos biológicos.

### **Algas:**

Organismos microscópicos que requieren de la luz para realizar las funciones vitales, es decir, son vegetales. Las toxinas que contienen pueden dañar al hígado (hepatitis), gastroenteritis o hepatoenteritis.

### **Hongos:**

Microorganismos no fotosintéticos por lo regular son pluricelulares; se alimentan de materia orgánica muerta o como parásitos.

### **Protozoarios:**

Forma animal más pequeña que se reproduce por fisión binaria. Los protozoarios son causantes de problemas gastrointestinales como la amibiasis (Jiménez, 2002; Torres, 2005).

### **3.14.3 Patógenos en el agua residual doméstica**

**Protozoarios:** *Entamoeba histolítica*, *Giardia lamblia*, *Balantidium coli*.

**Helmintos:** *Ascaris lumbricoides*, *Ancylostoma duodenale*, *Necator americanus*, *Ancylostoma spp.*, *Strogylodes stercolaris*, *Trichuris trichiur*, *Taenia spp.*, *Enterobius vermicularis*, *Echinococcus granulosus*.

**Bacterias:** *Shigella spp.*, *Salmonella typhi*, *Vibrio cholerae*, *Escherichia coli*, *Yersinia enterocolítica*, *Leptospira spp.*

**Virus:** *Enterovirus spp.*, *Adenovirus spp.*, *Rotavirus spp.*, *Parvovirus spp.* (Torres, 2005)

### **3.15 Procesos de tratamiento del agua residual**

Las operaciones unitarias son aquellos métodos de tratamiento en los que predominan los fenómenos físicos, mientras que aquellos métodos en los que la eliminación de los contaminantes se realiza en base a procesos químicos o biológicos se conocen como procesos unitarios (Tchobanoglous y Burton, 1997).

Existe una cantidad considerable de procesos para el tratamiento del agua, los cuales se pueden clasificar en tres categorías:

#### **3.15.1 Tratamientos físicos**

Son los que no generan sustancias nuevas, sino que concentran los contaminantes al evaporar el agua o filtran los sólidos de tamaño considerable. Los tratamientos físicos mas comunes son filtración, adsorción, aireación, floculación y clarificación o sedimentación (Arellano, 2002).

#### **3.15.2 Tratamientos químicos**

Son los que dan como resultado la formación de nuevas sustancias, los mas comunes son la coagulación, desinfección, ablandamiento y oxidación (Arellano, 2002).

#### **3.15.3 Tratamientos biológicos**

Son los que utilizan organismos vivos para provocar cambios químicos, este tipo de tratamientos puede ser visto como una modalidad de tratamiento químico, entre los que podemos mencionar la digestión aerobia y la digestión anaerobia (Arellano, 2002).

En la actualidad, las operaciones y procesos unitarios se agrupan entre si para constituir los llamados tratamientos primarios, secundarios y terciarios (estos últimos, conocidos también como tratamiento avanzado) (Tchobanoglous y Burton, 1997).

El agua residual urbana es originalmente orgánica, esto significa que los principales procesos de tratamiento están dirigidos a la eliminación de la composición orgánica.

En una planta de tratamiento típica, el agua residual se dirige a lo largo de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos en los que cada uno posee una función para reducir una carga contaminante específica (Bettini, 1998; Kiely, 1999).

*Estas funciones son típicamente:*

Pretratamiento:	Físico y/o químico
Tratamiento primario:	Físico
Tratamiento secundario:	Biológico
Tratamiento avanzado:	Físico y/o químico y/o biológico

*Pretratamiento* es el proceso o procesos que preparan las condiciones del agua residual que puede someterse a posteriores procesos de tratamiento secundario biológicos convencionales. En agua residual urbana esto significa la separación de materia flotante, arena y manchas de aceites (Kiely, 1999).

El *pretratamiento físico* incluye las operaciones de homogenización y la eliminación de arena y otras partículas macroscópicas con rejillas de gruesos y de partículas finas. De ser necesario, dichas partículas pueden eliminarse también por *pretratamiento químico* (Kiely, 1999).

El *tratamiento primario* consiste en la separación de materiales fácilmente aislables (aceites, sólidos flotantes, sólidos de rápida sedimentación) y la preparación del agua residual para tratamientos posteriores (Metcalf y Eddy, 1996). Por este tratamiento se separan o

eliminan la mayoría de los sólidos suspendidos en las aguas negras, es decir aproximadamente 40 a 60% mediante el proceso físico de asentamiento en tanques de sedimentación (D.S.E.N.Y., 2004).

El *tratamiento secundario*, normalmente es la parte mas importante del proceso y se emplea fundamentalmente para separar el grueso de los sólidos, los materiales orgánicos (peligrosos y no peligrosos) y otros materiales solubles (Metcalf y Eddy, 1996).

Este tratamiento debe hacerse cuando el agua negra todavía contiene, después del tratamiento primario, más sólidos orgánicos en suspensión o solución que los que puedan ser asimilados por las aguas receptoras sin oponerse a su uso normal adecuado. El tratamiento secundario depende principalmente de los organismos aerobios, para la descomposición de los sólidos orgánicos hasta transformarlos en sólidos inorgánicos o en sólidos orgánicos estables. Pueden aplicarse los métodos de lodos activados, filtros percoladores o lagunas aireadas. Este tratamiento es comparable a la zona de recuperación de la auto purificación de una corriente (Kiely, 1999; D.S.E.N.Y., 2004).

El *tratamiento terciario*, que implica procesos como la filtración con arena, ósmosis inversa, absorción y electrodiálisis, se utiliza (si es necesario) para separar cualquier contaminante residual que no haya sido eliminado durante los procesos de eliminación anteriores (Metcalf - Eddy, 1996).

#### **3.15.4 Sistemas de tratamiento aerobios**

La mayoría de las plantas de tratamiento existentes son aerobias. Las razones para esta preferencia frente a los sistemas anaerobios son:

- La mayor gama de agua residual que puede ser tratada mediante este sistema.
- La mayor estabilidad que presenta el proceso y la facilidad de control, y

- La capacidad de conseguir un mayor grado de eliminación de DBO, nitrógeno y fósforo.

Como el metabolismo se lleva a cabo mas lentamente, los sistemas anaerobios requieren un mayor tiempo de residencia del residuo en el reactor. Esto se traduce en la necesidad de un reactor de mayor volumen para tratar la misma cantidad de residuos (Seoanez, 1993).

### **3.15.5 Tratamiento biológico del agua residual**

Los tratamientos biológicos consisten en reproducir los procesos de autodepuración existentes en la naturaleza, pero bajo condiciones controladas y concentrando los procesos en tiempo y espacio (Bettini, 1998).

En los procesos de depuración del agua residual, los tratamientos biológicos constituyen una importante alternativa. Su aplicación está basada en el aprovechamiento de la capacidad de microorganismos para eliminar por asimilación y descomposición la materia orgánica biodegradable presente en el agua residual. Los equipos utilizados para estos procesos son los biorreactores o reactores biológicos (Demergasso *et al*, 2005).

### **3.15.6 Principios de la oxidación biológica**

Los mecanismos de separación de materia orgánica incluyen:

- Biodegradación
- Desorción con aire (lavado con aire)
- Adsorción

La adsorción de compuestos orgánicos no degradables en partículas sólidas biológicas no es significativo, pero si se presenta en ciertos compuestos orgánicos incluyendo los pesticidas, por ejemplo, el lindano. Los metales pesados se adsorberán en la biomasa, se

bioacumularán, con el resultado de una formación de lodos conteniendo metales pesados. En los sistemas aerobios se produce el lavado con aire del carbón orgánico volátil (COV). La rotura del material carbonoso por degradación aerobia emite  $\text{CO}_2$  y otros COV hacia la atmósfera (Kiely, 1999).

La biodegradación es el mecanismo dominante para la eliminación de compuestos orgánicos en el agua residual urbana y en la mayoría de la industrial (Kiely, 1999; Levin y Gealt, 1997).

El entendimiento del proceso de lodos activados, desde que fuera introducido por primera vez en Manchester por Arden y Locket en 1914, ha hecho progresos importantes. El proceso está gobernado por microorganismos característicos y por la configuración física del reactor biológico (flujo en pistón, mezcla completa, etc.). El proceso es dinámico, como tal la cinética biológica y la cinética del proceso son indivisibles. Ya sea que el sistema de tratamiento secundario es del tipo de cultivos en suspensión (por ejemplo, lodos activados) o del tipo de cultivo fijo (usando lechos para el crecimiento de microorganismos) depende de los mismos principios biológicos; es decir, utiliza una población microbiana para degradar la materia carbonosa (Kiely, 1999).

### **3.15.7 Lodos activados**

Los lodos activados es un proceso que se emplea generalmente después de la sedimentación simple. Las aguas negras contienen algo de sólidos suspendidos y coloidales, de manera que cuando se agitan en presencia de aire, los sólidos suspendidos forman núcleos sobre los cuales se desarrolla la vida biológica pasando gradualmente a formar partículas más grandes de sólidos que se conocen como lodos activados (D.S.E.N.Y., 2004).

Los lodos activados están formados por flóculos parduscos que consisten, principalmente la materia orgánica procedente del agua negra,

poblados por colonias de bacterias y otras formas de vida biológica. Estos lodos tienen la propiedad de absorber o de adsorber la materia orgánica coloidal y disuelta, incluyendo el amoníaco con lo que disminuye la cantidad de sólidos suspendidos. La generación de lodos activados o flóculos en el agua negra es un proceso lento, de manera que la cantidad así formada en cualquier momento, durante su periodo de tratamiento es muy corta e inadecuada para tratar rápida y eficazmente las aguas negras, pues se requiere de una gran concentración de lodos activados (D.S.E.N.Y., 2004).

El empleo de lodos activados ofrece una alternativa para el tratamiento del agua residual ya que posee una gran variedad de microorganismos capaces de remover materia orgánica presente en el agua, esto se ve favorecido por el uso de reactores que proveen las condiciones necesarias para la biodegradación (Castorena *et al*, 2005).

El proceso de lodos activados tiene como objetivo la remoción de materia orgánica, en términos de DQO, del agua residual. La combinación de microorganismos y agua residual se conoce como lodos activados (Castorena *et al*, 2005).

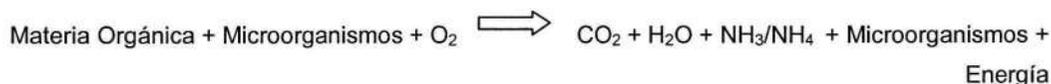
El proceso de los lodos activados es quizá el proceso biológico de mas amplio uso para el tratamiento de agua residual, orgánica e industrial. Han surgido variaciones del sistema básico durante algunos años, los cuales confieren al tratamiento una versatilidad que le permite adaptarse a un amplio campo de circunstancias operacionales (Seoanez, 1993).

Experimentalmente, el sistema de tratamiento de agua residual por medio de lodos activados reduce el olor del influente de fuerte a ligero al terminar el proceso; el color cambia de un tono opaco a turbio o casi incoloro en algunos casos; la DBO se reduce en promedio 80% y la remoción de materia orgánica alcanza una eficiencia de por lo menos 75% (Castorena *et al*, 2005).

### 3.15.8 Mecanismo del sistema de lodos activados (componentes biológicos y no biológicos)

Los organismos biológicos utilizan como alimento el material absorbido convirtiéndolo en sólidos insolubles no putrescibles. Casi toda esta transformación es un proceso que se verifica gradualmente. Algunas bacterias atacan las sustancias complejas originales, produciendo como desecho compuestos mas simples. Otras bacterias usan estos desechos produciendo compuestos aún mas simples, continuando así el proceso hasta que los productos finales de desecho no puedan ya ser usados como alimento por las bacterias (D.S.E.N.Y., 2004).

El mecanismo general del sistema de fangos activos viene representado por la siguiente reacción biológica:



La biodegradación (oxidación de la materia orgánica disuelta en el agua) la llevan a cabo los microorganismos presentes en el flóculo. El flóculo individual es la unidad ecológica y estructural del fango activo, y constituye el núcleo alrededor del cual se desarrolla el proceso de depuración biológica. El tamaño medio del flóculo oscila entre las 100 y 500 micras. A medida que aumenta el tamaño del flóculo, el oxígeno en su interior disminuye, y se pueden formar zonas de anoxia donde pueden crecer bacterias anaerobias metanogénicas y que pueden arrancar el proceso de digestión anaerobia de fangos, como veremos más adelante (UAM, 2005).

En el flóculo de fangos activos existen 2 **componentes** denominados biológico y no biológico. El **componente biológico** principal está constituido por una amplia variedad de microorganismos tales como:

## **Bacterias**

Es el componente principal y fundamental del flóculo. Básicamente son heterótrofas: Bacilos Gram negativos del grupo de las *Pseudomonas* como *Zoogloea* (principalmente la especie *ramigera*); *Pseudomonas* o *Comamonas*; bacterias filamentosas sin septos como *Flavobacterium-Cytophaga*; o proteobacterias oxidantes del hidrógeno como *Alcaligenes* (con capacidad desnitrificante). Entre las bacterias Gram positivas se pueden encontrar: *Arthrobacter* (corineformes con morfogénesis coco-bacilo, muy abundantes en el suelo) y *Bacillus* (Bacilo esporógeno aerobio ). Por otra parte, un flóculo "ideal" contiene una serie de bacterias filamentosas desarrollándose en equilibrio con el resto de las bacterias.

## **Hongos**

Los fangos activados no suelen favorecer el crecimiento de hongos, aunque algunos filamentosos sí pueden, ocasionalmente, ser observados en los flóculos de los fangos activos, como los géneros: *Geotrichum*, *Penicillium* o *Cephalosporium*.

## **Protozoos**

Los principales microorganismos eucariotas presentes en los fangos activos son los protozoos ciliados libres (*Paramecium*), fijos (*Vorticella*) o reptantes (*Aspidisca*, *Euplotes*), los cuales se encuentran en altas densidades y desempeñan un importante papel en el proceso de depuración y en la regulación del resto de la comunidad biótica. Mejoran la calidad del efluente y regulan la biomasa bacteriana al predear sobre las bacterias dispersas del licor de mezcla. Otros protozoos presentes son los flagelados *Bodo* o *Pleuromonas* y, dentro del grupo sarcodina, el género *Amoeba*.

## Metazoarios

Aunque pueden estar presentes en las balsas de activación organismos multicelulares tales como Nemátodos, Anélidos, Crustáceos o Acaros, los organismos multicelulares más comunes son los Rotíferos (*Lecane*, *Philodina* o *Notommata*). Eliminan bacterias libres y posibles patógenas (*Salmonelas*, bacterias fecales, etc.) y producen un mucus que mantienen el flóculo junto con el exopolisacárido producido por la bacteria *Zooglea ramigera*.

## Algas microscópicas

Si bien no suelen formar parte del flóculo, pueden aparecer en aquella agua residual con gran cantidad de materia orgánica. Entre las más comunes se encuentran *Cosmarium* y *Pediastrum* (*chlorophyta*); *Euglena* (*Euglenophyta*) y *Pinnularia* (*Chrysophyta*).

La presencia de diferentes organismos determina el grado de DBO presente, puesto que cada uno de los grupos vistos requiere unas condiciones de oxígeno determinadas. El **componente no biológico** del flóculo contiene partículas orgánicas e inorgánicas que provienen del agua residual, junto con polímeros extracelulares (principalmente polisacáridos producidos por algunos de los microorganismos señalados anteriormente) que tienen un importante papel en la biofloculación del fango activo (UAM, 2005).

### 3.16 Marco Legislativo en México para la contaminación del agua

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), en su título IV sobre Protección al Ambiente, capítulo III, referente a la prevención y control de la contaminación del agua y de los ecosistemas acuáticos, señala en el artículo 117 fracción III:

“El aprovechamiento del agua en actividades productivas susceptibles de producir su contaminación, conlleva la responsabilidad

del tratamiento de las descargas, para reintegrarla en condiciones adecuadas para su utilización en otras actividades y para mantener el equilibrio de los ecosistemas”, así mismo en la fracción IV del mismo artículo dice:

“Las aguas residuales de origen urbano deben recibir tratamiento previo a su descarga en ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo” (LGEEPA, 2005).

### **3.16.1 Normatividad Ambiental en materia de Agua Residual**

A nivel federal se cuenta con la siguiente normatividad:

La Norma Oficial Mexicana NOM – 001 – SEMARNAT – 1996, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de agua residual en aguas y bienes nacionales; se publicó en el diario oficial de la federación el 2 de mayo de 1997.

La Norma Oficial Mexicana NOM – 002 – SEMARNAT – 1996, establece los límites máximos permisibles en las descargas de agua residual a los sistemas de alcantarillado, se publicó en el diario oficial de la federación el 3 de junio de 1998.

La Norma Oficial Mexicana NOM – 003 – SEMARNAT - 1997, establece los límites máximos permisibles de contaminantes para el agua residual tratada que se reuse en servicios al público; se publicó en el diario oficial de la federación el 21 de septiembre de 1998 (Walss, 2001).

### **3.17 *Chlorella vulgaris***

En ecosistemas acuáticos naturales o artificiales, las microalgas son siempre asociadas con las bacterias. No se sabe si estas bacterias se asocian a ellas, promueven su crecimiento, realizan simbiosis o simplemente coexisten con las microalgas. Con excepción de unas

cuantas, estas bacterias rara vez son aisladas o caracterizadas (Bashan y de-Bashan, 2003).

Microalgas de varias especies son usadas en tratamiento terciario de agua residual, sobre todo especies de *Chlorella* (*Chlorophyceae*) (Valderrama *et al*, 2002). *Chlorella vulgaris* es una microalga comúnmente usada en el tratamiento de agua residual (de-Bashan *et al*, 2004).

Las interacciones entre la microalga *Chlorella* y otros microorganismos en su nicho ecológico o durante el tratamiento de agua residual no ha sido completamente estudiado. La coinmovilización de la microalga *Chlorella vulgaris* con la bacteria promotora del crecimiento de microalgas, *Azospirillum brasilense*, bajo sistemas de tratamiento semi continuos en agua residual sintética, incrementó significativamente la remoción de iones amonio y fósforo soluble, en comparación con la inmovilización de *Chlorella* sin esta bacteria. La inmovilización de la microalga *Chlorella* con la bacteria promotora de su crecimiento *Azospirillum* puede servir como una herramienta en la creación de nuevos tratamientos de agua residual (de-Bashan *et al*, 2002).

Experimentos a escala de laboratorio fueron realizados para desarrollar un procedimiento de tratamiento biológico de efluentes industriales anaerobios recalcitrantes (provenientes de la producción de ácido cítrico y etanol) utilizando primeramente la microalga *Chlorella vulgaris*, seguida de la macrofita *Lemna minuscula* (Valderrama *et al*, 2002).

El alga unicelular *Chlorella vulgaris* es capaz de remover mas del 55% de los fosfatos provenientes del agua residual de las empresas productoras de leche de vaca y cría de cerdos. Por ejemplo, *C. vulgaris*, inmovilizada en dos tipos de gel natural de polisacáridos se ha utilizado en el tratamiento de agua residual doméstica. Mas del 95% del amonio y 99% de los fosfatos fueron removidos del agua residual en 3 días (de-Bashan y Bashan, 2004).

La co-inmovilización de la bacteria *Azospirillum brasilense* y la microalga *Chlorella vulgaris*, aumenta la remoción de nitrógeno y fósforo, respecto a la remoción hecha por la microalga sola, removiendo hasta el 100% del amonio y 92% del fósforo en un periodo de 6 días, comparado con el 75% del amonio y 89% del fósforo removido por *Chlorella* sola (de-Bashan *et al*, 2003).

A nivel comercial, el producto utilizado es un catalizador biológico hecho a base de microorganismos benéficos (microalgas del genero *Chlorella*) y un surfactante, en forma de líquido concentrado. Es una formulación compleja que incrementa el metabolismo celular de los microorganismos presentes en el agua residual, cuerpos de agua, sedimentos, lodo y suelos contaminados (Comercializadora de Productos Biogenéticos, 2005).

### 3.17.1 Taxonomía de *Chlorella vulgaris*

*Chlorella vulgaris* es un alga verde (clorofita) eucariote, útil en la purificación de agua residual, donde puede facilitar considerablemente la oxigenación (Rodríguez, Porras, 1996; Rost *et al*, 1985; Strasburguer *et al*, 1974).

<b>Reino</b>	<i>Plantae</i>
<b>Sub - Reino</b>	<i>Thallophyta</i>
<b>División (<i>phyllum</i>)</b>	<i>Chlorophyta</i>
<b>Clase</b>	<i>Chlorophyceae</i>
<b>Orden</b>	<i>Chlorococcales</i>
<b>Familia</b>	<i>Chlorophitae</i>
<b>Género</b>	<i>Chlorella</i>
<b>Especie</b>	<i>vulgaris</i>

### 3.18 Biorremediación del agua residual

Para solucionar de manera efectiva y rápida los problemas por malos olores, el límite máximo de la DBO y la generación excesiva de lodos en la PTAR, se aplicó la microalga *Chlorella vulgaris* por medio de

un producto biorremediador, que es un catalizador biológico hecho a base de microorganismos benéficos y un surfactante, en forma de líquido concentrado, cien por ciento biodegradable. Estimula el metabolismo bacteriano y por tanto los procesos de biodegradación en agua residual, cuerpos de agua contaminados, lodos, residuos y sedimentos.

Este producto es una formulación compleja que incrementa el metabolismo celular de los microorganismos presentes en el agua residual, cuerpos de agua, sedimentos, lodo y suelos contaminados (Comercializadora de Productos Biogénicos, 2005).

Los mismos autores mencionan que sus componentes inducen a la producción de enzimas intercelulares que aceleran e incrementan los procesos de biodegradación. Además, las microalgas presentes en el producen el oxígeno disuelto que requieren los microorganismos para su desarrollo y actividad biodegradante. Así mismo, la acción del biosurfactante que forma parte de la fórmula del bioremediador, rompe la tensión superficial de las grasas, hidrocarburos y compuestos insolubles dejándolos biodisponibles como fuente de energía y sustrato para los microorganismos, disminuyendo el tiempo de la biodegradación. Como resultado final de este proceso también se logra un incremento en el número de microorganismos (biomasa), a medida que pasan a través de la fase de crecimiento y reproducción. A partir de esto es evidente que si los microorganismos pueden activarse para alcanzar su máxima velocidad de metabolismo se obtendrá un mayor consumo de contaminantes. Adicionalmente, a medida que los microorganismos del bioremediador compiten con los microorganismos menos deseables por los nutrientes disponibles, la capacidad de estos otros microorganismos se ve disminuida reduciendo su capacidad para crear problemas de olores, la formación de ácido sulfhídrico gaseoso y de ácidos o gases corrosivos (Comercializadora de Productos Biogénicos, 2005).

El empleo del biorremediador en cuerpos de agua contaminados conllevan a una relación simbiótica siguiente: Las bacterias descomponen

la materia orgánica, formando nitrógeno inorgánico ( $\text{NH}_3$ ), fosfatos ( $\text{PO}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Las algas usan estos compuestos, junto con la energía de la luz solar, para la fotosíntesis, liberando oxígeno para la solución. El oxígeno es, a su vez, asimilado por las bacterias, cerrando así el ciclo.

La activación de la flora bacteriana por medio del uso del biorremediador permite que el tratamiento de afluentes residuales, cuerpos de agua contaminados y sedimentos alcance su nivel óptimo de eficiencia.

Este producto comercial ofrece ventajas tales como tiempos de acción cortos (entre 3 y 18 horas), actúa en un amplio rango de temperaturas (5 a 50 °C, inhibe malos olores, es inofensivo para el ser humano, plantas y animales y no requiere equipos especiales para su aplicación (Comercializadora de Productos Biogénicos, 2005).

## IV. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Localización del área de estudio

La Universidad Tecnológica de Torreón se encuentra ubicada en el Km. 10 de la carretera Torreón-Matamoros en los terrenos del Ejido El Águila, Municipio de Torreón, Coahuila. A una distancia de 400 m al este se encuentra el Ejido San Miguel, donde se ubica la línea colindante con el Municipio de Matamoros, Coahuila.

La universidad fue fundada en Septiembre de 1998 y en Junio de 1999 fueron inauguradas las instalaciones. Actualmente la Universidad cuenta con el 60 % de construcción del total de sus Instalaciones; 3 Laboratorios Pesados, 3 Edificios de Docencia, 1 Edificio de Vinculación, 1 Edificio de Biblioteca, 1 Edificio ó Anexo de Cafetería y 1 Gimnasio-Auditorio, en las cuales, se desenvuelven durante el transcurso del día 1,200 personas aproximadamente, incluyendo personal administrativo, docente, manual y universitario.

Desde el año de 1999, año que fue inaugurada la UTT, se cuenta con los servicios de energía eléctrica por parte de CFE, de limpieza por parte de PASA y el servicio de agua potable por parte de SIMAS.

El servicio de drenaje no existe a la fecha por ser una universidad alejada de la línea de descarga de drenaje municipal, aproximadamente a 2 Km., específicamente en el Ejido El Águila.

En base a la no existencia del servicio de drenaje, en el año de 2001 fueron adquiridos los accesorios para la instalación de una planta de tratamiento de agua residual (PTAR). En el año de 2002 la planta tratadora fue instalada en el límite oriente y al centro de la Universidad Tecnológica de Torreón.

Complementariamente, se adicionó a la planta tratadora de agua residual:

- Un sistema automatizado para cambiar el agua tratada hacia la cisterna #3 de almacenamiento, la cual tiene una capacidad total de 44 m<sup>3</sup>.
- Un sistema de control automatizado para riego presurizado en caso de que el arranque del cambio del agua tratada hacia la cisterna #3 no funcione.
- Un sistema automatizado en la fosa de agua residual para que arranque en caso de taponamiento por sólidos o en caso de que los otros dos arranques no funcionen.
- Un sistema de sensores de nivel de agua residual tratada el cual se activa si rebasa el límite máximo de capacidad del tanque de almacenamiento y manda una señal a una alarma de luz y sonido para evitar desbordamiento interno.
- Infraestructura de protección, tanto de los tanques de tratamiento como la caseta de control.

#### **4.2 Funcionamiento del sistema**

Este sistema es un tratamiento biológico para desechos domésticos utilizando el proceso de lodos activados. Dado que se instaló la planta tratadora cerca de las fosas para el agua residual, se realizaron modificaciones a las mismas para la captación de Sólidos Suspendidos (SS), así mismo, se incrementó el tiempo de exposición a la aireación efectiva con burbujeros de 0.5 cm. de diámetro durante 24 horas. Bajo condiciones de flujo bajo y alta Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), puede obtenerse un efluente de gran calidad. El diseño básico es el de captación de sólidos, período de aireación de 24 horas, aunado a un período de sedimentación definido, aproximadamente de 4 horas. El proceso de aireación purifica el agua residual por medio de la destrucción de los compuestos orgánicos usando aire para mezclar y oxidar el material volátil a gas, agua y lodo. Debido a la aireación continua de

estos sólidos concentrados, se reproducen organismos biológicos que crecen en colonias. Estas colonias atacan por si mismas a los materiales volátiles transformándolos en agua, dióxido de carbono y cenizas, dando como resultado un efluente claro y libre de olor.

Lo mismo sucede en los cuerpos de agua; cuando el desecho orgánico entra en él, el oxígeno disuelto en el agua decrece y la población bacteriana se incrementa. Conforme se mueve el agua residual doméstica hacia las partes más bajas de los cauces, las bacterias obtienen más oxígeno disuelto y consumen todo el material orgánico en un lapso de tiempo considerable. Básicamente se reproduce en la planta de tratamiento de agua residual, el proceso natural de depuración, pero en un espacio confinado llamado cámara de aireación. Esta provee un medio ambiente favorable para el crecimiento bacteriano para consumir la materia orgánica contenida en el agua residual.

#### **4.2.1 Flujo del agua residual en las instalaciones**

Todos los edificios están interconectados a una red de drenaje interna que inicia en la cafetería y termina en el edificio de biblioteca. La fosa en la cual se capta el agua residual se divide en dos cámaras, una sirve como captadora de sólidos y mediante decantación pasa a la segunda división en la cual se precipitan hacia el fondo los sólidos suspendidos que lograron pasar de la primera división, de ahí fluye el agua hacia los tanques tratadores con capacidad total de 10,000 litros y con una capacidad de tratamiento de 5,000 litros diarios. La planta tratadora cuenta con 4 tanques de tratamiento y uno de almacenamiento de igual capacidad. Cuando el tanque de almacenamiento alcanza el nivel de rebombeo, fluye el líquido en forma automática hacia la cisterna #3 de aireación continua, en la cual permanece durante 6 horas. La cantidad de agua residual recibida de los edificios, va de 8,000 a 25,000

litros diarios durante 6 días de la semana, el día de captación mínima es el sábado y el día de máxima captación es el lunes.

El edificio de máximo consumo de agua potable es la instalación dedicada a la cafetería, con 4,000 litros diarios aproximadamente y el edificio del mínimo consumo de agua potable es la instalación del área de vinculación, con 1,500 litros diarios aproximadamente.

Al momento de pasar por los tanques tratadores y antes del tanque de almacenamiento existe una cámara de cloración, en dicha cámara la cloración se realiza mediante el contacto del agua y las pastillas de cloro de 1" de espesor por 3" de diámetro. En la cisterna de almacenamiento se le aplica hipoclorito de calcio a razón de 1.5 Kg. por cada 20,000 lts tratados de agua residual.

Cuando el agua se ha aireado durante 12 horas continuas se activa el riego presurizado hacia el área de los pastos de la universidad, ahí termina el proceso de tratamiento de agua residual aplicada al pasto.

### **4.3 Uso del agua residual tratada**

La UTT a enero de 2006 cuenta con: 21,350.17m<sup>2</sup> de pasto (en los edificios y campo de fútbol), 100 eucaliptos (plaza y corredores), 100 rosales (interior de los pastos), 32 palmeras abanico (2 jardines), 29 palmeras coco plumoso (interior de los pastos) y un área de 2,048.14m<sup>2</sup> de jardines desérticos (divididos en 4 áreas para la práctica de la xeriscapía).

El almacenamiento del agua residual se lleva a cabo en la cisterna #3. Cuando se ha captado el volumen necesario para el riego de un área verde determinada se activa automáticamente el riego por aspersion.

El riego con agua residual tratada en las áreas verdes de los edificios y en el campo de fútbol se activa automáticamente cada 6 horas y el volumen mínimo para un área de riego es de 25,000 litros.

El riego a los jardines desérticos es cada mes y el volumen requerido es de 30,000 litros. El riego a las palmeras, eucaliptos y rosales es cada 15 días y el volumen requerido es de 30,000 litros.

#### **4.4 Análisis del agua residual tratada durante 2004**

A continuación se brindan los últimos resultados de los 20 parámetros analizados en el agua residual tratada y los valores máximos permisibles para uso en **áreas recreativas**, derivada de la aplicación directa al suelo según la **Ley Federal de Derechos de Agua**. Los máximos permisibles son según la **Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996**, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

**Cuadro 1. Parámetros y resultados del agua tratada de la universidad tecnológica de torreón y los máximos permisibles según la NOM – 001 – SEMARNAT – 1996, para el año 2004.**

<b>Parámetro</b>	<b>Agua Tratada en el tanque de almacenamiento</b>	<b>Máximos permisibles NOM-001-ECOL-1996</b>
pH	7.40	De 5.00 a 10.00
Temperatura (° C)	32.10	40
Material Flotante	Ausente	Ausencia
Sólidos sedimentables (mL/L)	11.00	N.A.
Grasas y Aceites (mg/L)	10.00	15.00
Sólidos Suspendidos Totales	55.00	125.00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)	149.77	150.00
Nitrógeno Total (mg/L)	181.22	N.A.
Fósforo Total (mg/L)	5.52	N.A.
Coniformes Totales (nmp/100 mL)	50.00	2,000.00
Huevos de Helminto	N.D.	1.00
Arsénico Total (mg/L)	<0.0012	0.20
Cadmio (mg/L)	<0.005	0.05
Cianuros (mg/L)	<0.0094	2.00
Cobre Total (mg/L)	<0.00545	4.00
Cromo Total (mg/L)	<0.026	0.50
Mercurio Total (mg/L)	<0.0005	0.005
Níquel Total (mg/L)	<0.0331	2.00
Plomo Total (mg/L)	<0.2557	5.00
Zinc Total (mg/L)	<0.1080	10.00

N.A. =No es Aplicable

N.D. =No detectada

Según se ve, en el cuadro anterior, ningún parámetro analizado excede los máximos permisibles con la norma, por lo cual es improbable que se presente algún problema de salud, derivado del contacto con el agua residual tratada después del tanque de almacenamiento de la planta tratadora, sin embargo, se contaba con la siguiente problemática:

#### 4.5 Problemática en la PTAR de la UTT

Los principales problemas detectados en la PTAR son los siguientes:

- Olores desagradables e insoportables en el perímetro de la planta de tratamiento.
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) en el límite máximo (149.77 mg/L).
- Generación de lodos al máximo en la fosa de agua residual.
- Generación de lodos al máximo en los 5 tanques de la planta tratadora con capacidad de 10 m<sup>3</sup> c/u.
- No existe el análisis de agua residual semestral de la NOM-001-ECOL-1996.
- No existe elaboración del reporte semestral de los análisis de agua residual ante la CNA.
- No existe aireación en la cisterna #3, que es la de almacenaje de agua residual.

Lo anterior justifica la búsqueda de alternativas que nos permitan mejorar la calidad del agua residual tratada; la aplicación de *Chlorella vulgaris* en la PTAR de la UTT, constituye una de ellas.

#### 4.6 Solución a la problemática

Buscando solucionar la problemática de la Planta de Tratamiento, fue necesario realizar una prueba de las **Algas Simbióticas Anaeróbias** (*Chlorella vulgaris*) durante 5 días consecutivos con 3.30 litros del producto. Esta prueba fue con la finalidad de conocer su efecto, mediante los parámetros comparativos del análisis de agua antes y después del proceso.

El 09 de Agosto de 2005 se tomaron muestras en 3 puntos diferentes de la planta de tratamiento de agua residual (Fosa de agua residual, tanque # 5 de almacenamiento y cisterna # 3 de almacenamiento) antes de aplicar el producto, con la finalidad de conocer la calidad del agua sin aplicación del producto. Este muestreo se referirá en lo sucesivo como **muestreo Inicial**.

La aplicación del producto inició el 10 de Agosto de 2005 y terminó el 14 de agosto de 2005.

El 15 de Agosto de 2005 se tomaron muestras en los mencionados tres puntos diferentes de Agua Residual Tratada después de aplicar el producto. Este muestreo se referirá en lo sucesivo como **muestreo final**. Los análisis fueron realizados por una empresa privada de la región, misma que entregó los resultados el 26 de agosto de 2005.

#### **4.7 Aplicación del Producto en la PTAR**

##### **4.7.1 Dosificación inicial**

Al inicio del tratamiento, el 10 de agosto de 2005, se realizó una aplicación del producto con una dosis del producto concentrado diluido en agua limpia con el objeto de homogenizar el producto y lograr hacer una distribución correcta. Con ello se trató el volumen de agua contenido en los tanques del sistema de tratamiento.

La dosificación inicial se distribuyó de la siguiente manera:

- a) 750 mL. del producto en la fosa.
- b) 750 mL. del producto en el cárcamo de bombeo
- c) 200 mL. del producto en cada uno de los 4 tanques aerobios.

De las dosis anteriores las dos primeras (incisos a y b) se aplicaron diluidas cada una en 200 litros de agua limpia y la de los tanques aerobios (inciso c) se aplicó diluida en 50 litros de agua por cada

dosis de 200 mL. Las tres se aplicaron lo más uniformemente posible. Ésta aplicación sólo se realizó por única vez al inicio del tratamiento y se llevó a cabo para estabilizar el proceso de la planta.

#### 4.7.2 Dosificación diaria:

Inmediatamente después de la dosificación inicial se efectuó una aplicación diaria del producto que contiene la microalga a la entrada de la fosa, con una solución preparada de la siguiente manera:

Se preparó un tanque de polipropileno (ROTOPLÁS o similar) con una válvula de globo ajustada a 700 mL/min, al cual se adicionaron 250 ml del biorremediador concentrado y se mezclaron con 1000 litros de agua, la inoculación se realizó durante 24 horas, por lo que, la mezcla se preparó a diario. La dosis diaria se aplicó del 11 al 14 de agosto de 2005.

En el cuadro 2 se resume la cantidad de *Chlorella vulgaris*, agua de dilución y su dosificación respectiva.

**Cuadro 2. Dosificación inicial y diaria de *Chlorella vulgaris* en la PTAR – UTT, agosto de 2005.**

Tratamiento	Cantidad de <i>Chlorella vulgaris</i> (mL)	Dilución en agua (L)	Dosificación
Dosis inicial en la fosa de agua residual	750*	200	Única*
Dosis en cárcamo de bombeo	750*	200	Única*
Dosis inicial en los tanques aerobios (4)	200 (c/u)*	50	Única*
Dosis diaria aplicada en la fosa	250	1000	700 mL/min.

\* Una sola aplicación al inicio del tratamiento

## 4.8 Parámetros analizados

Los parámetros requeridos por la UTT, con la finalidad de conocer la calidad del agua residual generada en sus instalaciones, así como la calidad del agua residual tratada añadiendo *Chlorella vulgaris*, se encuentran dentro de la NOM – 001 – SEMARNAT – 1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Son diez parámetros, de acuerdo al cuerpo receptor del agua residual tratada, que en este caso es el suelo.

Estos parámetros fueron clasificados en dos categorías:

**4.8.1 Parámetros físicos:** Sólidos Suspendidos Totales, Sólidos Volátiles, Olor y Color.

**4.8.2 Parámetros químicos:** Grasas y Aceites, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Nitrógeno Total, Acidez, Potencial Hidrogeno (pH) y Conductividad Eléctrica.

Como se mencionó anteriormente, en la alternativa de solución a la problemática, se tomaron muestras del agua residual antes de entrar a la PTAR y una vez tratada añadiendo *Chlorella vulgaris*. Los resultados de ambas series de análisis se compararon para encontrar la eficiencia del producto en la reducción de los parámetros.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Parámetros químicos del agua residual tratada en la PTAR - UTT

#### 5.1.1 Grasas y aceites

En el Cuadro 3 se presentan los datos de grasas y aceites presentes en el agua residual antes y después de la aplicación de *Chlorella vulgaris*, donde se puede observar que en la fosa de agua residual se logró una eficiencia de 84.39 %, con una reducción de 237 a 37 mg/L, rebasando el Limite Máximo Permisible (LMP) de la NOM – 001 – SEMARNAT – 1996, que es de 25 mg/L.

En el tanque # 5 de almacenamiento, la concentración se incrementó 74.36 %, con un aumento de 39 a 68 mg/L, debido probablemente a la acumulación proveniente del lavado de la cafetería ocurrida el 13 de agosto de 2005, excediendo también el LMP de la norma; esto se debe a que aunque la aplicación de *Chlorella vulgaris* se realizó de los días 10 al 14 de agosto de 2005, propiamente los días 13 y 14 de dicho mes, por ser sábado y domingo respectivamente, la planta no operó, además de la acumulación ya mencionada. En la cisterna de almacenamiento se logró una eficiencia de 68.75 %, con una reducción de 16 a 5 mg/L, valor dentro del LMP de la norma.

En el Cuadro 4 se observa que de la fosa de agua residual antes de la aplicación de *Chlorella vulgaris*, a la cisterna de almacenamiento después de la misma, existe una eficiencia global de 97.89 %, con una reducción de 237 a 5 mg/L, quedando dentro del LMP de la NOM – 001 – SEMARNAT – 1996, con lo que se aprecia que esta aplicación impacta positivamente la calidad del agua.

Las PTAR municipales que utilizan el proceso de lodos activados, reportan en promedio, en su proceso de tratamiento, una eficiencia de

72.73 % en la reducción de grasas y aceites (COCEF, 2005), lo que contrasta con el 97.89 % de reducción aplicando *Chlorella vulgaris*.

**Cuadro 3. Evaluación de la concentración de grasas y aceites en agua residual antes y después de la aplicación de *Chlorella vulgaris* en la PTAR - UTT, agosto de 2005.**

	Grasas y Aceites (mg/L)		Eficiencia de <i>Chlorella vulgaris</i> (%)	Reducción (mg/L)	LMP* en mg/L
	Muestreo inicial	Muestreo final			
Fosa de agua residual	237.00	37.00	84.39	200.00	25.00
Tanque # 5 de almacenamiento	39.00	68.00	-74.36	-29.00	25.00
Cisterna de almacenamiento	16.00	5.00	68.75	11.00	25.00

\* Limite máximo permisible según la NOM – 001 – SEMARNAT - 1996

**Cuadro 4. Eficiencia global en la reducción de la concentración de grasas y aceites en agua residual, derivada de la aplicación de *Chlorella vulgaris* en la PTAR - UTT, agosto de 2005.**

Fosa de agua residual sin aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i>	Cisterna de almacenamiento tras la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i>	Eficiencia de la fosa de agua residual (antes) y la cisterna de almacenamiento (después) en %
237.00	5.00	97.89

### 5.1.2 Demanda bioquímica de oxígeno

En el Cuadro 5 se presentan los datos de la demanda bioquímica de oxígeno presente en el agua residual antes y después de la aplicación de *Chlorella vulgaris*, donde se puede observar que en la fosa de agua residual se logró una eficiencia de 48.57 %, con una reducción de 140 a 72 mg/L; este parámetro no aplica de acuerdo a la NOM – 001 – SEMARNAT – 1996.

En el tanque # 5 de almacenamiento, se logró una eficiencia de 74.36 %, con una reducción de 150 a 70 mg/L. En la cisterna de almacenamiento se logró una eficiencia de 64.10 %, con una reducción de 39 a 14 mg/L.

En el Cuadro 6 se observa que de la fosa de agua residual antes de la aplicación de *Chlorella vulgaris*, a la cisterna de almacenamiento después de la misma existe una eficiencia global de 90.00 %, con una reducción de 140 a 14 mg/L, con lo que se aprecia que la aplicación de *Chlorella vulgaris* impacta positivamente la calidad del agua.

Otros estudios indican que en el proceso de lodos activados, la eficiencia en la reducción de la DBO varía entre 25 y 42.85 %, con resultados máximos de alrededor de 80% (COCEF, 2005; EPA, 2005; Garrido et al, 2005; PNUMA, 2003), que comparada con la eficiencia global alcanzada con la aplicación de *Chlorella vulgaris* (90 %), muestra el aumento en reducción derivado de ella.

**Cuadro 5. Evaluación de la demanda bioquímica de oxígeno en agua residual antes y después de la aplicación de *Chlorella vulgaris* en la PTAR - UTT, agosto de 2005.**

	Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)		Eficiencia de <i>Chlorella vulgaris</i> (%)	Reducción (mg/L)	LMP* en mg/L
	Muestreo inicial	Muestreo final			
Fosa de agua residual	140.00	72.00	48.57	68.00	N.A.
Tanque # 5 de almacenamiento	150.00	70.00	53.33	80.00	N.A.
Cisterna de almacenamiento	39.00	14.00	64.10	25.00	N.A.

\* Limite máximo permisible según la NOM – 001 – SEMARNAT - 1996  
N.A.: no aplica

**Cuadro 6. Eficiencia global en la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno en agua residual, derivada de la aplicación de *Chlorella vulgaris* en la PTAR - UTT, agosto de 2005.**

Fosa de agua residual sin aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i>	Cisterna de almacenamiento tras la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i>	Eficiencia de la fosa de agua residual (antes) y la cisterna de almacenamiento (después) en %
140.00	14.00	90.00

### 5.1.3 Nitrógeno total

En el Cuadro 7 se presentan los datos de Nitrógeno Total presente en el agua residual antes y después de la aplicación de *Chlorella vulgaris*, donde se puede observar que en la fosa de agua residual se logró una eficiencia de 41.84 %, con una reducción de 196.70 a 114.40 mg/L; este parámetro no aplica de acuerdo a la NOM – 001 – SEMARNAT – 1996.

En el tanque # 5 de almacenamiento, se logró una eficiencia de 3.56 %, con una reducción de 196.70 a 189.70 mg/L. En la cisterna de almacenamiento se logró una eficiencia de 45.75 %, con una reducción de 55.30 a 30.00 mg/L.

En el Cuadro 8 se observa que de la fosa de agua residual antes de la aplicación de *Chlorella vulgaris*, a la cisterna de almacenamiento después de la misma, existe una eficiencia global de 84.75 %, con una reducción de 196.70 a 30.00 mg/L, con lo que se aprecia que esta aplicación repercute positivamente en la calidad del agua en este parámetro.

Otros estudios indican para el proceso de lodos activados una eficiencia en la reducción de Nitrógeno Total de 42 % (COCEF, 2005; Garrido et al, 2005), que comparada con la eficiencia alcanzada con la aplicación de *Chlorella vulgaris*, arroja un incremento de 42.75 % adicional.

**Cuadro 7. Evaluación de la concentración de nitrógeno total en agua residual antes y después de la aplicación de *Chlorella vulgaris* en la PTAR - UTT, agosto de 2005.**

	Nitrógeno Total (mg/L)		Eficiencia de <i>Chlorella vulgaris</i> (%)	Reducción (mg/L)	LMP* en mg/L
	Muestreo inicial	Muestreo final			
Fosa de agua residual	196.70	114.40	41.84	82.30	N.A.
Tanque # 5 de almacenamiento	196.70	189.70	3.56	7.00	N.A.
Cisterna de almacenamiento	55.30	30.00	45.75	25.30	N.A.

\* Limite máximo permisible según la NOM – 001 – SEMARNAT - 1996  
N.A.: no aplica

**Cuadro 8. Eficiencia global en la reducción de la concentración de nitrógeno total en agua residual, derivada de la aplicación de *Chlorella vulgaris* en la PTAR - UTT, agosto de 2005.**

Fosa de agua residual sin aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i>	Cisterna de almacenamiento tras la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i>	Eficiencia de la fosa de agua residual (antes) y la cisterna de almacenamiento (después) en %
196.70	30.00	84.75

#### 5.1.4 Acidez

De acuerdo al cuadro 9, se observa que la acidez no se detectó en los análisis de las muestras de agua residual, antes y después de la aplicación de *Chlorella vulgaris*, es decir, no presentan este parámetro, por lo que puede decirse que *Chlorella vulgaris*, no favorece su aparición; este parámetro no aplica de acuerdo a la NOM – 001 – SEMARNAT – 1996.

**Cuadro 9. Evaluación de la acidez en agua residual antes y después de la aplicación de *Chlorella vulgaris* en la PTAR - UTT, agosto de 2005.**

	Acidez		LMP*
	Muestreo inicial	Muestreo final	
Fosa de agua residual	N.D.	N.D.	N.A.
Tanque # 5 de almacenamiento	N.D.	N.D.	N.A.
Cisterna de almacenamiento	N.D.	N.D.	N.A.

\* Limite máximo permisible según la NOM – 001 – SEMARNAT - 1996

N.D.: no detectada en análisis

N.A.: no aplica

### 5.1.5 pH

Los datos del Potencial Hidrógeno (pH) presente en el agua residual antes y después de la aplicación de *Chlorella vulgaris*, se presentan en el Cuadro 10, en el se puede observar que en la fosa de agua residual se incrementó el valor en 8.33 %, con un aumento de 7.20 a 7.80, observando que el Limite Máximo Permisible (LMP) de la NOM – 001 – SEMARNAT – 1996, no se rebasa a pesar de esta situación, pues el rango establece valores de 5 a 10. En el tanque # 5 de almacenamiento, la concentración se incrementó 7.79 %, con un aumento de 7.70 a 8.30, valor dentro del LMP de la norma. En los dos puntos anteriores este aumento probablemente se debió a la interrupción del proceso de la PTAR los días 13 y 14 de agosto de 2005. En la cisterna de almacenamiento se observa un incremento de 13.89%, con un aumento de 7.20 a 8.30. Este aumento se debe probablemente a la suspensión de la aplicación de cloro con fines de desinfección, acción realizada con la finalidad de que no interfiriera con la aplicación de *Chlorella vulgaris*.

En el Cuadro 11 se observa que de la fosa de agua residual antes de la aplicación de *Chlorella vulgaris*, a la cisterna de almacenamiento después de la misma, existe una eficiencia global negativa, es decir, un incremento del pH, de 13.89 %, con un aumento de 7.20 a 8.20, valor permisible dentro del LMP de la NOM – 001 – SEMARNAT – 1996, con lo que se aprecia que esta aplicación impacta negativamente la calidad del agua en este parámetro, pero en un rango que no afecta el cumplimiento de los valores de la norma.

Como se mencionó anteriormente, el incremento dentro de la cisterna de almacenamiento se atribuye al cese de la aplicación de cloro en la misma, con la finalidad de que no interfiriera durante la aplicación de *Chlorella vulgaris*.

**Cuadro 10. Evaluación del pH en agua residual antes y después de la aplicación de *Chlorella vulgaris* en la PTAR - UTT, agosto de 2005.**

	pH		Eficiencia de <i>Chlorella vulgaris</i> (%)	Reducción	LMP* en rango
	Muestreo inicial	Muestreo final			
Fosa de agua residual	7.20	7.80	-8.33	-0.60	5 a 10
Tanque # 5 de almacenamiento	7.70	8.30	-7.79	-0.60	5 a 10
Cisterna de almacenamiento	7.20	8.20	-13.89	-1.00	5 a 10

\* Limite máximo permisible según la NOM - 001 - SEMARNAT - 1996

**Cuadro 11. Eficiencia global en la reducción del pH en agua residual, derivada de la aplicación de *Chlorella vulgaris* en la PTAR - UTT, agosto de 2005.**

Fosa de agua residual sin aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i>	Cisterna de almacenamiento tras la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i>	Eficiencia de la fosa de agua residual (antes) y la cisterna de almacenamiento (después) en %
7.20	8.20	-13.89

### 5.1.6 Conductividad eléctrica

En el Cuadro 12 se presentan los datos de Conductividad Eléctrica presente en el agua residual antes y después de la aplicación de *Chlorella vulgaris*, donde se puede observar que en la fosa de agua residual se logró una eficiencia de 18.60 %, con una reducción de 2150.00 a 1750  $\mu\text{s}/\text{cm}$ .; este parámetro no aplica de acuerdo a la NOM – 001 – SEMARNAT – 1996.

En el tanque # 5 de almacenamiento, se encontró un incremento de 8.84 %, con un aumento de 2150.00 a 2340.00  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ., esto debido probablemente al aumento de la actividad biológica dentro de este, causada por la aplicación de *Chlorella vulgaris*, que como se mencionó en la revisión de literatura, esta microalga utiliza el nitrógeno inorgánico, fosfatos y dióxido de carbono generado por la actividad bacteriana en el proceso de lodos activados, generando a su vez oxígeno, que utilizan las bacterias, así cerrando el ciclo, lo que provoca una mayor degradación de los compuestos presentes en el agua residual, provocando un aumento en los iones presentes en el volumen de agua residual que se está tratando.

En la cisterna de almacenamiento se logró una eficiencia de 22.92 %, con una reducción de 960.00 a 740.00  $\mu\text{s}/\text{cm}$ .

En el Cuadro 13 se observa que de la fosa de agua residual antes de la aplicación de *Chlorella vulgaris*, a la cisterna de almacenamiento después de la misma, existe una eficiencia global de 65.58 %, con una reducción de 2150.00 a 740.00  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , con lo que se aprecia que esta aplicación impacta positivamente la calidad del agua en este parámetro.

Otros estudios indican para el proceso de lodos activados una eficiencia en la reducción de la Conductividad Eléctrica de 30 % (COCEF, 2005; Garrido et al, 2005), por lo que al alcanzarse una reducción de

65.58 % con la aplicación de *Chlorella vulgaris*, se observa el beneficio que arroja el uso de la microalga.

**Cuadro 12. Evaluación de la conductividad eléctrica en agua residual antes y después de la aplicación de *Chlorella vulgaris* en la PTAR - UTT, agosto de 2005.**

	Conductividad Eléctrica (µs/cm.)		Eficiencia de <i>Chlorella vulgaris</i> (%)	Reducción (µs/cm.)	LMP* en µs/cm.
	Muestreo inicial	Muestreo final			
Fosa de agua residual	2150.00	1750.00	18.60	400.00	N.A.
Tanque # 5 de almacenamiento	2150.00	2340.00	-8.84	-190.00	N.A.
Cisterna de almacenamiento	960.00	740.00	22.92	220.00	N.A.

\* Limite máximo permisible según la NOM – 001 – SEMARNAT - 1996  
N.A.: no aplica

**Cuadro 13. Eficiencia global en la reducción de la conductividad eléctrica en agua residual, derivada de la aplicación de *Chlorella vulgaris* en la PTAR – UTT, agosto de 2005.**

Fosa de agua residual sin aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i>	Cisterna de almacenamiento tras la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i>	Eficiencia de la fosa de agua residual (antes) y la cisterna de almacenamiento (después) en %
2150.00	740.00	65.58

## 5.2 Parámetros físicos del agua residual tratada

### 5.2.1 Sólidos suspendidos totales

En el Cuadro 14 se presentan los datos de Sólidos Suspendidos Totales presentes en el agua residual antes y después de la aplicación de *Chlorella vulgaris*, donde se puede observar que en la fosa de agua residual se logró una eficiencia de 29.35 %, con una reducción de 103.33 a 73.00 mg/L.; valor dentro del Limite Máximo Permisible (LMP) de la NOM – 001 – SEMARNAT – 1996, que es de 125 mg/L.

En el tanque # 5 de almacenamiento, se logró una eficiencia de 20.00 %, con una reducción de 40.00 a 32.00 mg/L de sólidos suspendidos totales. Por otro lado, en la cisterna de almacenamiento se observa un incremento de 41.67 %, con un incremento de 12.00 a 17.00 mg/L, debido probablemente al almacenamiento del agua residual tratada durante los días 13 y 14 de agosto de 2005 (sábado y domingo respectivamente), puesto que estos días no trabajó la PTAR.

En el Cuadro 15 se observa que de la fosa de agua residual antes de la aplicación de *Chlorella vulgaris*, a la cisterna de almacenamiento después de la misma, existe una eficiencia global de 83.55 %, con una reducción de 103.33 a 17.00 mg/L de sólidos suspendidos totales, con lo que se aprecia que esta aplicación impacta positivamente la calidad del agua.

Otros estudios indican para el proceso de lodos activados una eficiencia en la reducción de sólidos suspendidos totales de entre 40 y 70 %, resultados que comparados con los obtenidos en la aplicación de *Chlorella vulgaris*, permite apreciar que la reducción de sólidos suspendidos totales aumenta al utilizar la microalga, pues en este caso fue de 83.55 % (COCEF, 2005; Garrido et al, 2005; PNUMA, 2005).

**Cuadro 14. Evaluación de la concentración de sólidos suspendidos totales en agua residual antes y después de la aplicación de *Chlorella vulgaris* en la PTAR - UTT, agosto de 2005.**

	Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)		Eficiencia de <i>Chlorella vulgaris</i> (%)	Reducción (mg/L)	LMP* en mg/L
	Muestra inicial	Muestreo final			
Fosa de agua residual	103.33	73.00	29.35	30.33	125.00
Tanque # 5 de almacenamiento	40.00	32.00	20.00	8.00	125.00
Cisterna de almacenamiento	12.00	17.00	-41.67	-5.00	125.00

**Cuadro 15. Eficiencia global en la reducción de la concentración de sólidos suspendidos totales en agua residual, derivada de la aplicación de *Chlorella vulgaris* en la PTAR - UTT, agosto de 2005.**

Fosa de agua residual sin aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i>	Cisterna de almacenamiento tras la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i>	Eficiencia de la fosa de agua residual (antes) y la cisterna de almacenamiento (después) en %
103.33	17.00	83.55

### 5.2.2 Sólidos Volátiles

En el Cuadro 16 se presentan los datos de Sólidos Volátiles presentes en el agua residual antes y después de la aplicación de *Chlorella vulgaris*, donde se puede observar que en la fosa de agua residual se logró una eficiencia de 39.86 %, con una reducción de 690.00 a 415.00 mg/L.; valor que no aplica de acuerdo a la NOM – 001 – SEMARNAT – 1996.

En el tanque # 5 de almacenamiento, se observa un incremento de 34.16 %, con un aumento de 336.66 a 451.66 mg/L. En la cisterna de almacenamiento se observa un incremento de 150.05 %, con un incremento de 36.66 a 128.33 mg/L. Los incrementos en estos dos puntos se debieron probablemente a la acumulación de materia orgánica en el agua residual durante los días 13 y 14 de agosto de 2005 (sábado y domingo respectivamente), en los que no trabajó la PTAR. La interrupción del proceso de tratamiento del agua residual y por lo tanto la inmovilidad de la misma, posiblemente favorecieron la formación de estos compuestos.

En el Cuadro 17 se observa que de la fosa de agua residual antes de la aplicación de *Chlorella vulgaris*, a la cisterna de almacenamiento después de la aplicación de la misma, existe una eficiencia global de 81.40 %, con una reducción de 690.00 a 128.33 mg/L, con lo que se aprecia que esta aplicación repercute positivamente en la calidad del agua en este parámetro.

Otros estudios indican para el proceso de lodos activados una eficiencia en la reducción de sólidos volátiles de 50% (COCEF, 2005; Garrido et al, 2005), que comparados con la reducción de 81.40 % obtenida tras aplicar *Chlorella vulgaris*, muestran una mejoría adicional mayor de 30 %.

**Cuadro 16. Evaluación de la concentración de sólidos volátiles en agua residual antes y después de la aplicación de *Chlorella vulgaris* en la PTAR - UTT, agosto de 2005.**

	Sólidos Volátiles (mg/L)		Eficiencia de <i>Chlorella vulgaris</i> (%)	Reducción (mg/L)	LMP* en mg/L
	Muestreo inicial	Muestreo final			
Fosa de agua residual	690.00	415.00	39.86	275.00	N.A.
Tanque # 5 de almacenamiento	336.66	451.66	-34.16	-115.00	N.A.
Cisterna de almacenamiento	36.66	128.33	-250.05	-91.67	N.A.

\* Limite máximo permisible según la NOM – 001 – SEMARNAT - 1996  
N.A.: no aplica

**Cuadro 17. Eficiencia global en la reducción de la concentración de sólidos volátiles en agua residual, derivada de la aplicación de *Chlorella vulgaris* en la PTAR - UTT, agosto de 2005.**

Fosa de agua residual sin aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i>	Cisterna de almacenamiento tras la aplicación de <i>Chlorella vulgaris</i>	Eficiencia de la fosa de agua residual (antes) y la cisterna de almacenamiento (después) en %
690.00	128.33	81.40

### 5.2.3 Color

El color se refiere a las sustancias disueltas en el agua, de forma tal que, cuanto mayor es la cantidad de sustancias disueltas en ella, es más oscuro su color. En el Cuadro 18 se presentan los datos del color presente en el agua residual antes y después de la aplicación de *Chlorella vulgaris*, donde se observa que en la fosa de agua residual se conservó un color café oscuro, lo cual muestra que no se redujo la cantidad de sustancias disueltas en el agua residual tratada. En el tanque # 5 de almacenamiento se conservó también un color café oscuro tras la aplicación de *Chlorella vulgaris*, que también indica que no se redujo la cantidad de sustancias disueltas, mientras que en la cisterna de almacenamiento el color se conservó café claro en el agua residual tras ser tratada, situación que indica también que no se presentó una reducción en este parámetro.

El color en la fosa de agua residual antes y la cisterna de almacenamiento después de la aplicación de *Chlorella vulgaris* cambió de café oscuro a café claro, pero este cambio en la coloración, que es positivo para la calidad del agua, no está influido por la aplicación de *Chlorella vulgaris*, con lo que se concluye que la microalga no actuó en la reducción del color en el proceso de tratamiento del agua residual.

**Cuadro 18. Evaluación del color en agua residual antes y después de la aplicación de *Chlorella vulgaris* en la PTAR - UTT, agosto de 2005.**

	Color	
	Muestreo Inicial	Muestreo Final
Fosa de agua residual	Café oscuro	Café oscuro
Tanque # 5 de almacenamiento	Café oscuro	Café oscuro
Cisterna de almacenamiento	Café claro	Café claro

#### 5.2.4 Olor

El olor es una característica del agua que se refiere al estado de la misma. El olor en aguas residuales domesticas frescas es apenas perceptible generalmente, pero si ya se encuentran en estado séptico ya existirá y puede ser bastante desagradable. En agua potable, se debe tener una ausencia total de olor. En el Cuadro 19 se presentan los datos del olor presente en el agua residual antes de la aplicación de *Chlorella vulgaris* y después de la aplicación de la misma, donde se observa que en la fosa de agua residual se redujo de fétido a poco fétido, cambio que muestra el impacto positivo de la aplicación de *Chlorella vulgaris*. En el tanque # 5 de almacenamiento el olor se redujo de fétido a poco fétido, cambio que es también positivo para la calidad del agua, mientras que en la cisterna de almacenamiento el olor no mostró cambios, conservándose poco fétido.

El olor de la fosa de agua residual antes a la cisterna de almacenamiento después de la aplicación de *Chlorella vulgaris* se redujo de fétido a poco fétido, lo cual muestra el impacto positivo de la aplicación de *Chlorella vulgaris* en el proceso de la PTAR, siendo mas notorio este cambio en la fosa de agua residual y el tanque de almacenamiento.

**Cuadro 19. Evaluación del olor en agua residual antes y después de la aplicación de *Chlorella vulgaris* en la PTAR - UTT, agosto de 2005.**

	Olor	
	Muestreo inicial	Muestreo Final
Fosa de agua residual	Fétido	Poco olor fétido
Tanque # 5 de almacenamiento	Fétido	Poco olor fétido
Cisterna de almacenamiento	Poco Fétido	Poco Fétido

## VI. CONCLUSIONES

El uso de *Chlorella vulgaris* en el tratamiento de agua residual en el proceso de lodos activados en la planta de tratamiento de la UTT, mejoró la calidad del agua residual generada en sus instalaciones.

En el parámetro de demanda bioquímica de oxígeno, el cual de acuerdo a los resultados de análisis hechos al agua residual tratada en 2004, que se presentan en el Cuadro 1, se encontraba casi en el límite máximo permisible de acuerdo a la NOM – 001 – SEMARNAT – 1996, se obtuvo una eficiencia en su reducción de 90 % con la aplicación de *Chlorella vulgaris*.

Los parámetros de grasas y aceites, nitrógeno total, conductividad eléctrica, sólidos suspendidos totales y sólidos volátiles, con la aplicación de *Chlorella vulgaris*, se mejoraron respecto a lo reportado en estudios de la eficiencia del proceso de lodos activados por si solo.

En lo referente a la acidez y color, la aplicación de *Chlorella vulgaris* no favorece su presencia en el agua residual tratada.

En el parámetro de olor, la aplicación de *Chlorella vulgaris* permitió una ligera mejoría en la calidad del agua residual tratada.

En el parámetro de pH, se observó un incremento en su concentración tras la aplicación de *Chlorella vulgaris* en el proceso de tratamiento, pero en un rango que no afecta el cumplimiento de la NOM – 001 - SEMARNAT – 1996.

El desempeño de *Chlorella vulgaris* puede ser afectado por descargas repentinas de agua residual o por el cese del proceso de depuración de agua residual en la planta de tratamiento.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

- Arellano, D.J. 2002. Introducción a la Ingeniería Ambiental. 1ª edición. Alfa Omega grupo editor. México, D.F. PP. 27 – 47.
- Bashan, Y. y L.E. de-Bashan. 2003. [en línea]. Microalgae growth-promoting bacteria: a novel approach in water science; a micro-review. In: Vol 1. Oral presentations. 6th International PGPR workshop, 5-10 October 2003, Edited by: M.S. Reddy, M. Anandaraj, S.J. Eapen, Y.R. SARma, and J.W. Kloepper. Indian Institute of Spices Research, Calicut, India. pp. 53-58. Disponible en: <http://www.bashanfoundation.org/gmaweb/pdfs/IndiaMGPB.pdf>. Consultado el 17/10/05.
- Bettini, V. 1998. Elementos de Ecología Urbana. 1ª edición. Editorial Trotta. Madrid, España. PP. 245 – 267.
- Castorena, T.F., J. Jarquin V., A. Quiroz S., L.F. Valdivia D. 2005. Tratamiento de aguas residuales mediante el sistema de lodos activados. [en línea]. Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Xochimilco. Disponible en: <http://www2.cbm.uam.es/jalopez/personal/SeminariosVarios/ERARtexto.htm>. Consultado el 17/10/05.
- Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF). 2005. [en línea]. Estudio del agua residual tratada para uso agrícola en valle de Juárez, Chihuahua. Disponible en: <http://www.cocef.org/aproyectos/juarez-esp.htm>. Consultado el 12/01/06.
- Comercializadora de Productos Biogénéticos, S.A. de C.V. (CPB). 2005. Manual del usuario del Producto Albisol®.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 2002. El agua, recurso estratégico y de seguridad Nacional. México, D.F. PP. 41 – 48.

Comisión Nacional del Agua (CNA). 2003. El Agua en México, retos y avances. México, D.F. PP. 20 – 22, 37 – 40.

Crites, R. y Tchobanoglous, G. 2000. Tratamiento de Aguas Residuales en pequeñas poblaciones. 1ª edición. Editorial McGraw – Hill. Santa Fe de Bogotá. PP. 2-3, 21-25, 34, 44, 50-52.

de-Bashan, L.E., M. Moreno, J.P. Hernández y Y. Bashan. 2002. [en línea]. Removal of ammonium and phosphorus ions from syntetic wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* coimmobilized in alginate beads with the microalgae growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense* . Water Research 36: 2941-2948. Disponible en: <http://www.bashanfoundation.org/gmaweb/pdfs/ammoniumre.pdf>. Consultado el 17/10/05.

de-Bashan, L.E., J.P. Hernández, H. Antoun, y Y. Bashan. 2003. [en línea]. Enhanced removal of nitrogen and phosphorus from wastewater by the microalgae *Chlorella* sp. using the microalagae growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. In: Vol 2. Abstracts and short papers. 6th International PGPR workshop, 5-10 October 2003, Edited by: M.S. Reddy, M. Anandaraj, S.J. Eapen, Y.R. SArma, and J.W. Kloepper. Indian Institute of Spices Research, Calicut, India. pp. 294-300. Disponible en: <http://www.bashanfoundation.org/gmaweb/pdfs/IndiaNPremov.pdf>. Consultado el 17/10/05.

de-Bashan, L.E. y Y. Bashan. 2004. [en línea]. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997-2003). Water Research 38: 4222-4246. Disponible en: <http://www.bashanfoundation.org/gmaweb/pdfs/P-removal.pdf>. Consultado el 17/10/05.

de-Bashan L.E., J.P. Hernandez, T. Morey, y Y. Bashan. 2004 . [en línea]. Microalgae growth-promoting bacteria as "helpers" for microalgae: a novel approach for removing ammonium and phosphorus for municipal wastewater. Water Research 38:466-474. Disponible en: <http://www.bashanfoundation.org/gmaweb/pdfs/DomesticNP.pdf>. Consultado el 17/10/05.

Departamento de Sanidad del estado de Nueva York (D.S.E.N.Y.). 2004. Manual de tratamiento de aguas negras. Vigésima reimpresión. Editorial Limusa. México, D.F. PP. 41 – 44, 71 – 99.

Demergasso, S.C., P. Galleguillos P., L. Escudero G. y E. Lam E.. 2005. [en línea]. Estudio De La Cinética De Bioconversión De Aguas Residuales En La Producción De Agua Potable. XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Asociación Brasileña de Ingeniería sanitaria y ambiental. Disponible en: <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsaidis/aresidua/i-151.pdf>. Consultado el 17/10/05.

Environmental Protection Agency (EPA). 2005. [en línea]. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Disponible en: <http://www.epa.gov/owmitnet/mtb/cs-99-062.pdf>. Consultado el 15/01/06.

- Rodríguez, C.B. y M.C. Porras. 1996. Botánica Sistemática (compilación). 1ª edición. Imprenta Universitaria UACH. Chapingo, Méx. PP. 69 – 73.
- Rost, C.K., J. Walstein y Y. Reed. 1985. Botánica. Introducción a la biología vegetal. 1ª edición. Editorial Limusa Noriega. México, D.F. PP. 261 – 263.
- Scott, C.A. (éd.) / Faruqi, N.I. (éd.) / Raschid-Sally, L. (éd.). 2004. [en línea]. Wastewater use in irrigated agriculture. Confronting the livelihood and environmental realities. : Wallingford : CABI Publishing. Disponible en: <http://www.cabi-publishing.org/bookshop>. Consultado el 30/08/05.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2005 (1). [en línea] NORMA Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Disponible en: <http://portal.semarnat.gob.mx/semarnat/portal/!ut/p/kcxml/04> Consultado el 09/10/2005
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2005 (2). [en línea]. NORMA Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. Disponible en: <http://portal.semarnat.gob.mx/semarnat/portal/!ut/p/kcxml/04>. Consultado el 09/10/2005.

- Seoanez C.M. 1993. Aguas residuales Urbanas. 1ª edición. Editorial Mundi Prensa. Madrid, España. PP. 131 – 132.
- Serrano, E.L. 1997. Las aguas residuales y su tratamiento. 1ª edición. Editorial Erca. México, D.F. PP. 142 – 153.
- Strasburguer, F., West, L., H. Losting y D. Webb. 1974. Tratado de Botánica. 1ª edición. Editorial Marín. Barcelona, España. PP. 437 – 443.
- Tchobanoglous, G. y F. Burton. 1997. Ingeniería de Aguas Residuales; tratamiento, vertido y reutilización. 3ª edición. Editorial McGraw Hill. México, D.F. PP. 1-8
- Torres, C.E. 2005. [en línea]. Reutilización de aguas y lodos residuales. Disponible en: <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/lodos.pdf>. Consultado el 30/08/2005.
- Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). 2005 [en línea]. Depuración de aguas residuales. Disponible en: <http://www2.cbm.uam.es/SeminariosVarios/lodostexto.htm>. Consultado el 17/10/05.
- Valderrama, L.T., C.M. Del Campo, C.M. Rodriguez, L.E. de-Bashan y Y. Bashan. 2002. [en línea]. Treatment of recalcitrant wastewater from ethanol and citric acid production using the microalgae *Chlorella vulgaris* and the macrophyte *Lemna minuscula*. Water Research 36: 4185-4192. Disponible en: <http://www.bashanfoundation.org/gmaweb/pdfs/luztbioreme.pdf> Consultado el 17/10/05.

Vigueras, C.J.M. G. Orea L. y G. Vicencio R. 2003. Reuso De Aguas Residuales Tratadas De Una Telesecundaria Para Producción De Flores Y Hortalizas. Memorias del XIV Congreso Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Agropecuario. SEP – SEIT – DGETA. Durango, Dgo.

Walss, A.R. 2001. Guía Práctica para la gestión ambiental. 1ª edición. Editorial McGraw Hill. México, D.F. PP. 149 – 157.

Winkler M. 1985. Tratamiento biológico de las aguas de desecho. 1ª edición. Editorial Limusa. México, D.F. PP. 34 – 37, 87 – 89, 183 – 189.