

## INDICE.

<b>Resumen.....</b>	<b>Pág. 7</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>Pág.8</b>

### **CONSIDERACIONES GENERALES:**

Justificación del Tema.....	Pág. 9
Objetivos Generales y Específicos.....	Pág. 9
Importancia.....	Pág. 9

### CAPITULO I

#### **Origen, Característica y Tratamiento de Las Aguas Residuales.**

1.1 Origen de las Aguas Residuales.....	Pág. 11
<b>1.1.2 Tipos De Aguas Residuales.....</b>	<b>Pág. 12</b>
1.1.2.1 Aguas Residuales Urbanas.....	Pág. 12
1.1.2.2 Aguas Residuales Industriales.....	Pág. 13
<b>1.1.3 Tipos De Contaminantes.....</b>	<b>Pág. 13</b>
1.1.3.1 Contaminantes Químicos.....	Pág. 15
1.1.3.2 Contaminantes Físicos.....	Pág. 15
1.1.3.3 Contaminantes Biológicos.....	Pág. 17
<b>1.2. Características:.....</b>	<b>Pág. 18</b>
<b>1.2.1. Características de las Aguas Residuales.....</b>	<b>Pág. 18</b>
<b>1.2.2. Aspectos Físicos, Químicos y Biológicos.....</b>	<b>Pág. 19</b>
1.2.2.1 Características Físicas.....	Pág. 19
1.2.2.2 Sustancias Químicas (Composición).....	Pág. 19
1.2.2.3 Características Bacteriológicas.....	Pág. 19
<b>1.2.3 Formas de medir la Calidad de las Aguas.....</b>	<b>Pág. 19</b>
1.2.3.1 Análisis del Ph.....	Pág. 19
1.2.3.2 Ensayos Biológicos.....	Pág. 20
1.2.3.3 Demanda Bioquímica De Oxigeno (DBO).....	Pág. 20

<b>1.3. Métodos de Tratamientos:</b> .....	Pág. 21
<b>1.3.1 Tratamiento Primario</b> .....	Pág. 21
1.3.1.1 Desbaste.....	Pág. 21
1.3.1.2 Desarenadores.....	Pág. 22
1.3.1.3 Sedimentación.....	Pág. 23
1.3.1.3.1 Sedimentación del Tipo 1.....	Pág. 23
1.3.1.3.2 Sedimentación del Tipo 2.....	Pág. 23
1.3.1.3.3 Sedimentación Zonal y por Compresión.....	Pág. 24
1.3.1.4 Flotación.....	Pág. 24
1.3.1.5 Digestión.....	Pág. 24
1.3.1.6 Deseccación.....	Pág. 25
<b>1.3.2 Tratamiento Secundario</b> .....	Pág. 25
1.3.2.1 Filtro De Goteo.....	Pág. 25
1.3.2.2 Lodo Activado.....	Pág. 25
1.3.2.3 Estanque de Estabilización o Laguna.....	Pág. 26
1.3.2.4 Tratamientos Biológicos.....	Pág. 26
<b>1.3.3. Tratamiento Avanzado de Aguas Residuales</b> .....	Pág. 27

## CAPITULO II

### **Tratamiento Biológico de las Aguas**

<b>Residuales</b> .....	Pág. 30
2.1. Algunos tratamientos Biológicos.....	Pág. 30
2.2. Tratamiento Aerobio de las Aguas Residuales.....	Pág. 31
<b>2.3. Importancia de los Microorganismos y Bacterias</b> .....	Pág. 32
<b>2.3.1. Bacterias</b> .....	Pág. 33
<b>2.3.2. Microbiología</b> .....	Pág. 34
2.3.2.1. Tipos de Organización Celular.....	Pág. 34
2.3.2.2. Estructura de la Pared Celular.....	Pág. 35
2.3.2.3. Membranas Biológicas.....	Pág. 35

2.3.2.4. Metabolismo Microbiano.....	Pág. 35
2.3.2.5. Crecimiento Celular.....	Pág. 36
<b>2.3.3. Factores Ambientales que afectan al Crecimiento.....</b>	<b>Pág. 40</b>
2.3.3.1. Aplicación de la Temperatura en Microorganismos.....	Pág. 40
2.3.3.2. Refrigeración.....	Pág. 40
2.3.3.3. Ph.....	Pág. 40
2.3.3.4. Potencial Redox, Concentración de Oxígeno.....	Pág. 41
2.3.3.5. Radiación.....	Pág. 42

### CAPITULO III

<b>Tratamiento Anaerobio de las Aguas Residuales.....</b>	<b>Pág. 43</b>
<b>3.1. Aplicación de Procesos en varias Etapas.....</b>	<b>Pág. 44</b>
3.1.1. Reactores Monoetapa con biomasa no soportada.....	Pág. 44
3.1.2. Reactores Monoetapa con biomasa inmovilizada.....	Pág. 44
3.1.3. Reactores Multietapa.....	Pág. 44
<b>3.2. Tipos de Tratamiento y Características.....</b>	<b>Pág. 45</b>
3.2.1. Reactor de Flujo Suspendido UASB.....	Pág. 46
3.2.2. Características Operacionales de este Proceso.....	Pág. 47
<b>3.3. Microbiología de la Digestión Anaerobia. Ventajas e Inconvenientes Frente a Procesos Aerobios.....</b>	<b>Pág. 47</b>
3.3.1. Fermentación Anaeróbica.....	Pág. 51
3.3.1.1. Principios de la Fermentación Anaeróbica.....	Pág. 51
3.3.1.2. Prerrequisitos Necesarios para Iniciar el Proceso.....	Pág. 51
3.3.2. Etapas de la Digestión Anaerobia.....	Pág. 51
3.3.2.1. Etapa Hidrolítica.....	Pág. 51
3.3.2.2. Etapa Fermentativa y Acetogénica.....	Pág. 52
3.3.2.3. Etapa Metanogénica.....	Pág. 53
<b>3.4. Cinética de la Digestión Anaeróbica.....</b>	<b>Pág. 55</b>
<b>3.4.1 El Paso Limitante.....</b>	<b>Pág. 55</b>
<b>3.4.2. Crecimiento, Muerte, Rendimiento y Actividad.....</b>	<b>Pág. 56</b>

<b>3.4.3. El Modelo Cinético de Monod.....</b>	<b>Pág. 56</b>
--	----------------

### **3.5. Ventajas e Inconvenientes de la Digestión**

<b>Anaeróbica.....</b>	<b>Pág. 57</b>
------------------------	----------------

<b>3.5.1. Ventajas.....</b>	<b>Pág. 57</b>
-----------------------------	----------------

<b>3.5.2. Inconvenientes.....</b>	<b>Pág. 57</b>
-----------------------------------	----------------

## **CAPITULO IV**

### **Construcción de Un Reactor Anaerobio Piloto**

<b>Continuo.....</b>	<b>Pág. 60</b>
----------------------	----------------

4.1. Identificación del Problema.....	Pág. 60
---------------------------------------	---------

4.2 Modelo Matemático del Sistema.....	Pág. 60
--	---------

4.2.1 Observador del Estado basado en Intervalos.....	Pág. 61
---	---------

#### 4.3. Criterios de Diseño Empleados en la Construcción del Reactor

Piloto.....	Pág. 65
-------------	---------

4.4 Volumen del Reactor.....	Pág. 65
------------------------------	---------

4.4.1 Tiempo de Retención Hidráulica.....	Pág. 66
---	---------

4.4.2 Velocidad Ascensional.....	Pág. 66
----------------------------------	---------

4.4.3 Carga Volumétrica.....	Pág. 66
------------------------------	---------

4.5 Dimensiones del Reactor.....	Pág. 66
----------------------------------	---------

4.6 Material del Reactor.....	Pág. 66
-------------------------------	---------

4.7 Relleno.....	Pág. 67
------------------	---------

#### 4.8 Descripción del Equipo y Funcionamiento de los

Accesorios.....	Pág. 67
-----------------	---------

4.8.1 Reactor.....	Pág. 67
--------------------	---------

4.8.2 Recolector de Gas.....	Pág. 67
------------------------------	---------

4.8.3 Accesorios.....	Pág. 67
-----------------------	---------

4.8.4 Tuberías.....	Pág. 67
---------------------	---------

4.9 Operación del Reactor.....	Pág. 68
4.10 Programa de Muestreo.....	Pág. 68

## CAPITULO V

### **Pruebas Experimentales Del Reactor Anaeróbico**

<b>UASB.....</b>	<b>Pág. 70</b>
5.1. Identificación de las Aguas Residuales que se utilizaron en el Reactor.....	Pág. 70
5.1.1. Temperatura.....	Pág.70
5.1.2. Nutrientes.....	Pág.70
5.1.3. Oxigeno Disuelto.....	Pág. 70
5.1.4. Ph.....	Pág. 70
5.2 Pruebas Experimentales (flujo=0.25ml/seg.).....	Pág. 71
5.3 Pruebas Experimentales (flujo=0.17 ml/seg.).....	Pág. 73
5.4. Pruebas Experimentales (2 últimas semanas).....	Pág. 75
5.5. Sólidos Totales.....	Pág. 75
5.6. Dato Corregido mediante la curva de la glucosa.....	Pág. 76

## CAPITULO VI

6.1 Análisis y Resultados.....	Pág. 81
6.2 Conclusiones.....	Pág. 83
6.3 Recomendaciones.....	Pág. 84

## CAPITULO VII

<b>7.1 ANEXO 1.....</b>	<b>Pág. 85</b>
<b>Definiciones y Nomenclatura</b>	
<b>7.2. ANEXO 2.....</b>	<b>Pág. 87</b>
<b>Curva del Phthalate</b>	
<b>7.3.ANEXO 3.....</b>	<b>Pág. 88</b>
<b>Curva de la Glucosa</b>	

**7.4. ANEXO 4.....Pág. 89**

**Fotos del Equipo e Instrumentos Utilizados**

**BIBLIOGRAFIA.....Pág. 97**

## RESUMEN

Realizamos la construcción y la puesta en marcha de un Reactor Anaerobio (UASB) piloto. En el que se evaluó y verificó el funcionamiento y el comportamiento del piloto, usando una agua residual procedente de un proceso de concentrado de Maracuyá, controlando los parámetros de operación como son: pH, alcalinidad, temperatura, Nutrientes, carga volumétrica, demanda química de oxígeno (DQO), tiempo de retención hidráulica (TRH); realizando diferentes pruebas que involucraron, variaciones de caudal, y carga orgánica.

Esta agua se degrada con mucha facilidad, reportando valores de  $DQO_{\text{entrada}} = 2988.05$ ,  $pH_{\text{entrada}} = 10.5$ , y una alcalinidad de hasta = 308.

El equipo piloto Anaerobio consta de un cuerpo cilíndrico (cuerpo del reactor) y una bomba dosificadora.

Luego de inocular y de poner el equipo piloto en marcha se operó durante 16 semanas, en las cuales se empezó a trabajar con un flujo de **0.25 ml/sg.** **Y con un Tiempo de Retención Hidráulica de 1,385 días; después de varios días de trabajo se le redujo el flujo a 0.17ml/ seg. Aumentando así el Tiempo de Retención Hidráulica a 2.04 días.**

En el funcionamiento del equipo piloto se presentaron algunos inconvenientes; tales como ph bajo, y la poca cantidad de Nitrógeno en el agua residual; en ciertas ocasiones el agua venía con soda, ya que con esta limpiaban algunos equipos (la soda mata las bacterias), en una ocasión por error alimentaron al equipo piloto con este tipo de agua y se tuvo que volver a inocular.

Teniendo bajo control los factores que afectan al digestor y teniéndolo en óptimas condiciones se llegó a remover hasta un 72 %.

## **ABSTRACT.**

We constructed and put into action a pilot of an anaerobic reactor (UASB). The pilot function and reactions were evaluated and verified using residual water from the process of making passion fruit concentrate, controlling the operating parameters of pH, alkalinity, temperature, nutrients, volumetric content, chemical demand of oxygen, hydraulic retention time and doing different tests involving variations in flow and organic content.

This water degrades easily, giving values of 2988.05 for CDO in, 10.5 for pH in and an alkalinity of 308.

The anaerobic equipment pilot consists of a cylindrical body (the reactor body) and a feed pump

After the inoculation and starting the equipment, it operated for 16 weeks in which it flowed at a rate of 0.25 ml/s with a hydraulic retention time of 1,385 days.

After various days of operation the flow was reduced to a rate of 0.17 ml/s, increasing the hydraulic retention time to 2.04 days.

In the functioning of the pilot a few problems arose, such as a lowering of pH, a low quality of nitrogen in the residual water, and on some occasions the water had soda ash which cleaned the equipment and killed the bacterium. On one occasion soda ash was accidentally put in the equipment, killing all the bacterium, causing it to have to be inoculated again.

With little control over the factors that affect the digester and at optimal conditions it was able to remove 72%.

# **CONSIDERACIONES GENERALES.**

## **Justificación del Tema.**

En el tratamiento de las aguas residuales no existe el remedio total. El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos unitarios continuos que permiten obtener un agua de óptima calidad, si es el caso para consumo humano; o un efluente con bajos niveles contaminantes para el medio (cuerpo) donde será incorporado, en el caso de las aguas residuales.

Hacia allá va dirigida nuestra investigación de tesis, como una alternativa para recuperar tan importante y vital recurso: El Agua. Por eso consideramos la construcción y la puesta en marcha de un equipo piloto que consiste en un Reactor Anaerobio con flujo ascendente y continuo (UASB), que fue puesto en operación en una fábrica con un agua residual cuya carga orgánica era muy alta.

Esta además decir, que no deja de ser importante el hecho de poder contar con un equipo que permitirá observar y analizar las reacciones ocurridas durante las pruebas con un nivel de planta piloto, obteniéndose una serie de valiosos datos; que de otra manera sería imposible recopilar.

## **Objetivos Generales y Específicos**

El objetivo general en este proyecto es el de remover la carga orgánica de un agua residual industrial mediante el empleo de un reactor anaerobio de flujo continuo y ascensional (UASB).

Como objetivo específico, es el construir un equipo piloto (reactor UASB), con el fin de depurar el agua residual, determinando los puntos a seguir para que este tenga una mayor eficiencia.

## **Importancia**

Sabemos que nuestro planeta no es capaz de soportar indefinidamente la contaminación masiva en cada unos de sus recursos que son originados por procesos productivos mal planificados y gestionados.

La actuación negativa sobre el medio ambiente que ha caracterizado a los sistemas productivos, se ha ejercido desde diferentes niveles por ejemplo:

- ◆ Sobre utilización de recursos naturales no renovables.
- ◆ Emisión de residuos no degradables al ambiente.
- ◆ Destrucción acelerada de especies animales y vegetales.
- ◆ Destrucción de espacios naturales.

En la actualidad en todas las ciudades las autoridades correspondientes velan por la protección de los recursos hídricos, es por eso que ha llevado a que todas las industrias implanten un sistema de depuración de las aguas efluentes del proceso industrial, porque en caso contrario las leyes castigarían con la suspensión de dicha fábrica por no cumplir con los parámetros establecidos; para poder descargar sus aguas residuales.

De aquí radica la importancia de este tema y también para que la sociedad haga conciencia sobre nuestro medio ambiente.

# **CAPITULO I**

## **ORIGEN, CARACTERISTICA Y TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES.**

### **1.1 ORIGEN DE LAS AGUAS RESIDUALES:**

El origen, composición y cantidad de los desechos están relacionados con los hábitos de vida vigentes. Cuando un producto de desecho se incorpora al agua, el líquido resultante recibe el nombre de **Agua Residual**.

Las aguas residuales tienen un origen doméstico, industrial, subterráneo y meteorológico, y estos tipos de aguas residuales suelen llamarse respectivamente, domésticas, industriales, de infiltración y pluviales.

Las cuatro fuentes de aguas residuales son:

1. Aguas domesticas o urbanas,
2. Aguas residuales industriales, (poner descripción)
3. Aguas de usos agrícolas, (poner descripción)
4. Aguas pluviales.

Aunque la mayor parte de las aguas servidas (cerca del 90%) provienen del uso domestico e industrial , la de usos agrícolas y pluviales urbanas están adquiriendo cada día mayor importancia, debido a que los escurrimientos de fertilizantes (fosfatos) y pesticidas representan los principales causantes del envejecimiento de lagos y pantanos proceso llamado eutrofización.

*Las aguas residuales domésticas* son el resultado de actividades cotidianas de las personas. La cantidad y naturaleza de los vertidos industriales es muy variada, dependiendo del tipo de industria, de la gestión de su consumo de agua y del grado de tratamiento que los vertidos reciben antes de su descarga.

*La infiltración* se produce cuando se sitúan conductos de alcantarillado por debajo del nivel freático o cuando el agua de lluvia se filtra hasta el nivel de la tubería. Esto no es deseable, ya que impone una mayor carga de trabajo al tendido general y a la planta depuradora. La cantidad de agua de lluvia que habrá que drenar dependerá de la pluviosidad así como de las escorrentías o rendimiento de la cuenca de drenaje.

Un área metropolitana estándar vierte un volumen de aguas residuales de entre el 60 y el 80% de sus requerimientos diarios totales, y el resto se usa para lavar coches y regar jardines, así como en procesos como el enlatado y embotellado de alimentos.

La contaminación actúa sobre el medio ambiente acuático alterando el delicado equilibrio de los diversos ecosistemas integrado por organismos productores, consumidores y descomponedores que interactúan con componentes sin vida originando un intercambio cíclico de materiales.

Las aguas residuales constituyen un importante foco de contaminación de los sistemas acuáticos, siendo necesarios los sistemas de depuración antes de evacuarlas, como medida importante para la conservación de dichos sistemas.

Las aguas residuales, contaminadas, son las que han perdido su calidad como resultado de su uso en diversas actividades. También se denominan vertidos. Se trata de aguas con un alto contenido en elementos contaminantes, que a su vez van a contaminar aquellos sistemas en los que son evacuadas.

Del total de vertido generado por los focos de contaminación, sólo una parte será recogida en redes de saneamiento, mientras que el resto será evacuado a sistemas naturales directamente.

### **1.1.2. TIPOS DE AGUAS RESIDUALES.**

Las aguas residuales es la basura líquida proveniente de tocadores, baños, regaderas, cocinas, etc., que es desechada a las alcantarillas. En muchas áreas, las aguas residuales también incluyen algunas aguas sucias provenientes de industrias. Muchas aguas residuales también incluyen aguas superficiales de los techos o áreas estancadas. Las aguas residuales municipales incluyen descargas residenciales, comerciales e industriales, y pueden incluir la salida de fuertes precipitaciones.

La clasificación se hace con respecto a su origen, ya que este origen es el que va a determinar su composición.

#### **1.1.2.1. AGUAS RESIDUALES URBANAS.**

Son los vertidos que se generan en los núcleos de población urbana como consecuencia de las actividades propias de éstos.

Los aportes que generan esta agua son:

- ◆ Aguas negras o fecales.
- ◆ Aguas de lavado doméstico.
- ◆ Aguas de limpieza de calles.
- ◆ Aguas de lluvia y lixiviados.

Las aguas residuales urbanas presentan una cierta homogeneidad cuanto a composición y carga contaminante, ya que sus aportes van a ser siempre los mismos. Pero esta homogeneidad tiene unos márgenes muy amplios, ya que las características de cada vertido urbano van a depender del núcleo de población en el que se genere, influyendo parámetros tales como el número de habitantes, la existencia de industrias dentro del núcleo, tipo de industria.

### **1.1.2.2. AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES.**

Son aquellas que proceden de cualquier actividad o negocio en cuyo proceso de producción, transformación o manipulación se utilice el agua. Son enormemente variables en cuanto a caudal y composición, difiriendo las características de los vertidos no sólo de una industria a otro, sino también dentro de un mismo tipo de industria.

A veces, las industrias no emiten vertidos de forma continua, si no únicamente en determinadas horas del día o incluso únicamente en determinadas épocas de año, dependiendo del tipo de producción y del proceso industrial. También son habituales las variaciones de caudal y carga a lo largo del día.

Son mucho más contaminadas que las aguas residuales urbanas, además, con una contaminación mucho más difícil de eliminar.

Su alta carga unida a la enorme variabilidad que presentan, hace que el tratamiento de las aguas residuales industriales sea complicado, siendo preciso un estudio específico para cada caso.

### **1.1.3. TIPOS DE CONTAMINANTES.**

Las fuertes concentraciones de población contribuyen a la rápida contaminación del agua y otros tipos de contaminación. Agua contaminada es el agua a la que se le incorporaron materias extrañas, como microorganismos, productos químicos, residuos industriales o de otros tipos, o aguas residuales. Estas materias deterioran la calidad del agua y la hacen inútil para los usos pretendidos

Los principales contaminantes del agua son los siguientes:

- ◆ Aguas residuales y otros residuos que requieren oxígeno: los desechos orgánicos pueden ser descompuestos por bacterias que puedan utilizar oxígeno (aerobias) y las que no precinden del oxígeno (anaerobias); para biodegradarlos. Si hay poblaciones grandes de estas bacterias, pueden agotar el oxígeno del agua, matando así las formas de vida acuáticas.
- ◆ Agentes infecciosos.
- ◆ Nutrientes vegetales que pueden estimular el crecimiento de las plantas acuáticas. Éstas, a su vez, interfieren con los usos a los que se destina el agua y, al descomponerse, agotan el oxígeno disuelto y producen olores desagradables.
- ◆ Productos químicos, incluyendo los pesticidas, varios productos industriales, las sustancias tensoactivas contenidas en los detergentes, y los productos de la descomposición de otros compuestos orgánicos.
- ◆ Petróleo, especialmente el procedente de los vertidos accidentales.
- ◆ Minerales inorgánicos y compuestos químicos.
- ◆ Sedimentos o materia suspendida: que enturbian el agua, y que son la mayor fuente de contaminación. formados por partículas del suelo y minerales

arrastrados por las tormentas y escorrentías desde las tierras de cultivo, los suelos sin protección, las explotaciones mineras, las carreteras y los derribos urbanos.

- ◆ Sustancias radiactivas procedentes de los residuos producidos por la minería y el refinado del uranio y el torio, las centrales nucleares y el uso industrial, médico y científico de materiales radiactivos.
- ◆ El calor también puede ser considerado un contaminante cuando el vertido del agua empleada para la refrigeración de las fábricas y las centrales energéticas hace subir la temperatura del agua de la que se abastecen.
- ◆ Agentes patógenos: bacterias, virus, protozoarios y parásitos que entran al agua proveniente de desechos orgánicos.

### 1.1.3.1. CONTAMINANTES QUÍMICOS.

Estos componen tanto productos químicos orgánicos como inorgánicos. El aspecto fundamental de la contaminación de productos orgánicos es la disminución del oxígeno como resultante de la utilización del existente en el proceso de degradación biológica, llevando con ello a un desajuste y a serias perturbaciones en el medio ambiente. En el caso de compuestos inorgánicos el resultado más importante es su posible efecto tóxico, más que una disminución de oxígeno. Sin embargo, hay casos en los cuales los compuestos inorgánicos presentan una demanda de oxígeno, contribuyendo a la disminución del mismo.

#### a) Agua coloreada

El agua coloreada es debida a los metales disueltos en el agua.

##### *Metales Disueltos:*

<b>METAL</b>	<b>COLOR</b>
Hierro	Verde, Rojo o Marrón
Cobre	Azul - Verdoso
Manganeso	Negro o Marrón

#### b) Flocculación

El agua pierde con frecuencia su condición de transparencia al aparecer ciertas turbiedades, provocadas por:

1. Presencia de algas.
2. Precipitación de las sales de calcio y magnesio.

3. Polvo introducido a través del aire.
4. Oxidación de las sales de hierro y manganeso.
5. Barro de lluvia.

En la mayoría de estos casos las partículas introducidas en el agua son de tamaño tan pequeño (coloidal) que carecen de entidad suficiente para ser retenidas por el equipo de filtración.

El empleo de un floculante nos producirá el aumento del tamaño de las partículas coloidales en suspensión y su descarga (decantación) al fondo del vaso de la piscina, siendo entonces fácil su eliminación.

### **1.1.3.2. CONTAMINANTES FÍSICOS.**

Estos incluyen:

#### **a) Cambios térmicos**

La temperatura es un parámetro muy importante por su efecto en la vida acuática, en las reacciones químicas, velocidades de reacción y en la aplicabilidad del agua a usos útiles, como el caso de las aguas provenientes de las plantas industriales, relativamente calientes después de ser usadas en intercambiadores.

#### **b) El color**

El cual determina cualitativamente el tiempo de las aguas residuales, es por ello que si el agua es reciente esta suele ser gris; sin embargo como quiera los compuestos orgánicos son descompuestos por las bacterias, el oxígeno disuelto en el agua residual se reduce a cero y el color cambia a negro.

#### **c) Corrosión**

La corrosión cambia las propiedades químicas y físicas de los metales, produciendo un ataque sobre estos (Eje.: tuberías, intercambiadores de calor, escaleras, etc.). La corrosión es un proceso completamente natural.

La corrosión se produce cuando los metales están en contacto con el agua. Los factores que aceleran la corrosión son:

1. pH Bajos.
2. Oxígeno Disuelto.
3. Aumento del pH.
4. Oxidantes.
5. Temperaturas Altas.
6. Velocidades de caudal Altas.

#### **d) La turbidez**

Originada por los sólidos en suspensión.

#### **e) Espumas**

Las espumas son causadas generalmente por:

- ◆ Uso excesivo de algicidas a base de Amonio Cuaternario.
- ◆ Exceso de residuos orgánicos de aceites solares o sudor.

#### **f) Detergentes**

Los detergentes son semejantes a los jabones porque tienen en su molécula un extremo iónico soluble en agua y otro extremo no polar que desplaza a los aceites. Los detergentes tienen la ventaja, sobre los jabones, de formar sulfatos de calcio y de magnesio solubles en agua, por lo que no forman coágulos al usarlos con aguas duras. Además como el ácido correspondiente de los sulfatos ácidos de alquilo es fuerte, sus sales (detergentes) son neutras en agua.

Los detergentes son productos que se usan para la limpieza y están formados básicamente por un agente tensoactivo que actúa modificando la tensión superficial disminuyendo la fuerza de adhesión de las partículas (mugre) a una superficie; por fosfatos que tienen un efecto ablandador del agua y flocculan y emulsionan a las partículas de mugre, y algún otro componente que actúe como solubilizante, blanqueador, bactericida, perfumes, abrillantadores ópticos (tinturas que dan a la ropa el aspecto de limpieza), etc.

La mayoría de los detergentes sintéticos son contaminantes persistentes debido a que no son descompuestos fácilmente por la acción bacteriana. A los detergentes que no son biodegradables se les llama detergentes duros y a los degradables, detergentes blandos.

#### **g) Radioactividad.**

Las radiaciones ultravioleta (uv), Rayos X y radiación  $\gamma$  producen efectos esterilizantes (destrucción de microorganismos) al alterar las proteínas, membranas, ácidos nucleicos y al generar radicales libres del tipo  $\text{OH}^\cdot$  y  $\text{H}^\cdot$ . El tratamiento matemático de la destrucción de microorganismos por estos procedimientos es similar al descrito para el uso de altas temperaturas. Hay que considerar, sin embargo, los poderes de penetración de los diferentes tipos de radiación. Así, por ejemplo, la radiación uv tiene un poder de penetración muy bajo y, por consiguiente, se utiliza para esterilizar superficies, mientras que la radiación X o la  $\gamma$  tienen poderes de penetración muchos mayores.

La resistencia de diferentes tipos de microorganismos a las radiaciones varía. Las esporas bacterianas, las bacterias, levaduras, hongos filamentosos y otras células eucarióticas son progresivamente más sensibles a las radiaciones. Hay algunos microorganismos especialmente resistentes a las radiaciones.

### **1.1.3.3. CONTAMINANTES BIOLÓGICOS.**

Los contaminantes de las aguas residuales son normalmente una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos. Normalmente no es ni práctico ni posible obtener un análisis completo de la mayoría de las aguas servidas.

Es por esto que las aguas residuales dependiendo de la cantidad de estos componentes se clasifican en fuerte, medio y débil. Debido a que la concentración como la composición va variando con el transcurso de tiempo, con los datos siguientes solo se pretende dar una orientación para la clasificación de las aguas servidas.

#### **Algas**

Las algas son plantas minúsculas las cuales a través del aire son y se desarrollan por la luz solar.

#### ***La formación de algas puede causar:***

- ◆ Agua verde.
- ◆ Superficies resbaladizas.

#### ***Tipos predominantes de algas:***

- ◆ Verdes.
- ◆ Negras (Azul - Verde).
- ◆ Mostaza (Amarillas).
- ◆ Rosa.

**Tabla 1**  
**Concentración (mg/l)**

Constituyente	Fuerte	Media	Débil
Sólidos, en total	1200	700	350
Disueltos, en total	850	500	250
Suspendidos, en total	350	250	100
Demanda Bioquímica de Oxígeno	300	200	100
Nitrógeno	85	40	20
Amoniaco Libre	50	25	12
Fósforo	20	10	6
Alcalinidad	200	100	50
Grasa	150	100	50

## **1.2. CARACTERÍSTICAS:**

### **1.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES.**

Los parámetros característicos, son:

- ◆ Temperatura
- ◆ pH
- ◆ Sólidos en suspensión totales (SST) o
- ◆ Materia orgánica valorada como DQO y DBO (a veces TOC)
- ◆ Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)
- ◆ Nitrógeno amoniacal y nitratos

Mencionar otros parámetros como fósforo total, nitritos, sulfuros, sólidos disueltos...

## **1.2.2. ASPECTOS FÍSICOS, QUÍMICOS Y BIOLÓGICOS.**

### **1.2.2.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.**

Aspecto, color, turbidez, SST y conductividad.

### **1.2.2.2. SUSTANCIAS QUÍMICAS (COMPOSICIÓN).**

Las aguas servidas están formadas por un 99% de agua y un 1% de sólidos en suspensión y solución. Estos sólidos pueden clasificarse en orgánicos e inorgánicos.

Los sólidos inorgánicos están formados principalmente por nitrógeno, fósforo, cloruros, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos y algunas sustancias tóxicas como arsénico, cianuro, cadmio, cromo, cobre, mercurio, plomo y zinc.

Los sólidos orgánicos se pueden clasificar en nitrogenados y no nitrogenados. Los nitrogenados, es decir, los que contienen nitrógeno en su molécula, son proteínas, ureas, aminas y aminoácidos. Los no nitrogenados son principalmente celulosa, grasas y jabones.

Aniones y cationes inorgánicos y compuestos orgánicos

### **1.2.2.3. CARACTERÍSTICAS BACTERIOLÓGICAS.**

- Coliformes totales
- Coliformes fecales
- Salmonellas
- Virus

## **1.2.3. FORMAS DE MEDIR LA CALIDAD DE LAS AGUAS.**

El grado de contaminación de las aguas residuales (el término "aguas servidas" no es correcto) se mide habitualmente por medio de la determinación de la materia orgánica presente. Dado que la determinación directa es muy dificultosa, se hace un examen de tipo indirecto determinando la cantidad de algún agente oxidante que se requiere para convertir esta materia orgánica en **anhídrido carbónico** y agua.

### **1.2.3.1 ANÁLISIS DEL PH.**

La concentración del Ion hidrogeno es un importante parámetro de calidad tanto para aguas naturales como aguas residuales. El intervalo de concentración para la existencia de la mayoría de la vida biológica es muy estrecho y critico. El agua industrial con una concentración adversa de Ion de hidrogeno es difícil de tratar con métodos biológicos y si la concentración no se altera antes de la evacuación, el efluente puede alterar la concentración de las aguas naturales.

El pH de los sistemas acuosos puede medirse convencionalmente con un pH-metro, así como se pueden utilizar indicadores que cambian de color a determinados valores de pH.

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$$

La alcalinidad en el agua residual se debe a la presencia de hidroxilo, carbonatos y bicarbonatos de elementos tales como calcio, magnesio, sodio, potasio o amoníaco, esta alcalinidad la va adquiriendo del agua de suministro, del agua subterránea y de materias añadidas durante el uso doméstico. La concentración de alcalinidad en el agua residual importante debe efectuarse un tratamiento químico o muestras en que se deba eliminar el amoníaco.

### 1.2.3.2 ENSAYOS BIOLÓGICOS.

Otra forma de medir la toxicidad de las aguas residuales en lo que respecta a la vida biológica son los ensayos biológicos. La finalidad de estos es específica es:

- ◆ Determinar la concentración de un agua residual dada que se produzca la muerte de un 50% de los organismos de ensayo en un periodo de tiempo especificado.
- ◆ Determinar la concentración máxima que no causa efecto aparente sobre los organismos de ensayo durante 96 horas.

Se consiguen estos objetivos introduciendo peces u otros animales adecuados en acuario conteniendo distintas concentraciones del agua residual en cuestión y observando seguidamente su supervivencia a lo largo del tiempo.

### 1.2.3.3 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DBO).

La demanda bioquímica de oxígeno se usa como una medida de la cantidad de oxígeno requerido para la oxidación de la materia orgánica biodegradable presente en la muestra de agua y como resultado de la acción de oxidación bioquímica aeróbica, es por esto que este parámetro de polución sea tan utilizado en el tratamiento de las aguas residuales, ya que con los datos arrojados se pueden utilizar para dimensionar las instalaciones de tratamiento, medir el rendimiento de algunos de estos procesos. Con los datos de la DBO podrá así mismo calcularse la velocidad a la que se requerirá el oxígeno. La demanda de oxígeno de aguas residuales es resultado de tres tipos de materiales:

- ◆ **Materiales Orgánicos Carbónicos**, utilizados como fuentes de alimentación por organismos aeróbicos o anaeróbicos.
- ◆ **Nitrógeno Oxidable**, derivado de la presencia de nitritos, amoníaco y en general compuestos orgánicos nitrogenados que sirven de alimento para bacterias específicas.
- ◆ **Compuestos Químicos Reductores**.

**La DBO** se define como la cantidad de oxígeno usada por la materia orgánica en la estabilización del agua residual o servida en un período de 5 días a 20° C. El concepto de DBO es muy usado y, por lo tanto, se requiere una especial comprensión del mismo. Aquí vamos a dar un ejemplo:

- ◆ Oxígeno disuelto al inicio (100 mg/100ml)
- ◆ Oxígeno disuelto al término (60 mg/100ml)

Esto indica que la DBO del agua en estudio es de 40 mg/100ml. Mientras mayor sea la DBO mayor será la cantidad de materia orgánica disuelta en el agua servida. En general las aguas potables no superan los 5 mg/100ml pero las aguas servidas pueden tener 300 mg/100ml.

### **1.3. MÉTODOS DE TRATAMIENTOS:**

Los métodos de tratamiento en los que predominan la aplicación de principios físicos se conoce como **Tratamiento Primario**. Los métodos de tratamiento en los que la eliminación de contaminantes se efectúa por actividad química o biológica son conocidos como **Tratamiento Secundario**. Recientemente el **Tratamiento Terciario o Avanzado** se ha aplicado a las operaciones o procesos utilizados para eliminar contaminantes que no se han visto afectados por los tratamientos antes mencionados.

#### **1.3.1 TRATAMIENTO PRIMARIO.**

Las aguas residuales que entran en una depuradora contienen materiales que podrían atascar o dañar las bombas y la maquinaria. Estos materiales se eliminan por medio de enrejados o barras verticales, y se queman o se entierran tras ser recogidos manual o mecánicamente. El agua residual pasa a continuación a través de una trituradora, donde las hojas y otros materiales orgánicos son triturados para facilitar su posterior procesamiento y eliminación.

##### **1.3.1.1. DESBASTE.**

La primera operación unitaria en las plantas de tratamiento de aguas residuales es la operación de desbaste. Una rejilla es un dispositivo con aberturas uniformes utilizado para retener generalmente los sólidos de cierto tamaño que arrastran las aguas residuales. Estos dispositivos además sirven para proteger las bombas, válvulas y otros elementos contra posibles daños y para evitar que se obstruyan por trapos o elementos de gran tamaño. Es por esto que las partículas mayores que los 0.5 cm pueden eliminarse mediante desbaste, siendo esta la mas económica entre las operaciones unitarias.

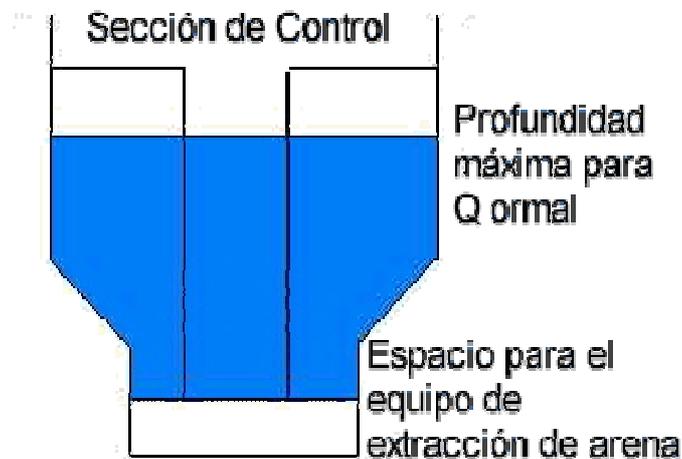
Otro mecanismo utilizado frecuentemente son las trituradoras en lugar de rejillas. Estos elementos rompen o desgarran los sólidos en suspensión retenidos en las rejas.

### 1.3.1.2 DESARENADORES

La misión de los Desarenadores es separar las arenas, la grasa, las cenizas y cualquier otro material pesado que tenga velocidad de sedimentación o peso específico superior a la de los sólidos orgánicos putrescibles del agua residual.

#### Pretratamiento.

El Pretratamiento consiste en eliminar la grasa y la espuma de las aguas residuales, antes de la sedimentación primaria, al objeto de mejorar su calidad. El Pretratamiento se compone de:



- **Tanques separadores de grasa:** estos consisten en depósitos dispuestos de tal manera que la materia flotante ascienda y permanezca en la superficie del agua residual hasta que se recoja y se elimine, mientras el líquido sale del tanque en forma continua, a través de una abertura situada en el fondo. Entre los residuos que recoge están el aceite, grasa, jabón, pedazos de madera y corcho, residuos vegetales entre otros.
- **Preaireación:** Los objetivos que persigue el airear el agua residual antes de la sedimentación primaria son: mejorar su tratabilidad, procurar la separación de las grasas, control de los olores, eliminación de arenas y aumentar las eliminaciones de DBO.
- **Floculación:** una parte esencial de cualquier sistema de precipitación química, o químicamente asistida es la agitación con vistas a aumentar la posibilidad de contacto de entre las partículas (floculación), tras la adición de un producto

químicos, el objetivo de este es aumentar la eliminación de sólidos suspendidos y la eliminación de DBO.

### 1.3.1.3 SEDIMENTACIÓN.

La sedimentación es la separación de las partículas mas pesadas en el agua mediante acción de la gravedad. Es una de las operaciones unitarias mas utilizadas en el tratamiento de las aguas residuales. Este tratamiento tiene como propósito fundamental obtener un efluente clarificado, pero también es necesario producir un fango con una concentración de sólidos que pueda ser tratado con facilidad.

En algunos casos, la sedimentación es el único paso en el tratamiento que se somete el agua residual. En una planta típica de lodos activados la sedimentación se efectúa en tres pasos:

- ◆ **Desarenadores**, en donde la materia orgánica se elimina.
- ◆ **Sedimentadores primarios**, que preceden al reactor biológico en donde los sólidos orgánicos y otros se separan.
- ◆ **Sedimentadores secundarios**, que siguen al reactor biológico, en los cuales el lodo biológico se separa del efluente tratado.

En base a la concentración y a la tendencia a la interacción de las partículas pueden efectuarse cuatro clasificaciones generales sobre la forma de dichas partículas que se depositan. Es frecuente que se produzca más de un tipo de sedimentación en un momento dado durante la sedimentación y también es posible que los cuatro tipos se tengan en forma simultánea.

#### 1.3.1.3.1. SEDIMENTACIÓN DEL TIPO 1.

Esta se refiere a la sedimentación de partículas discretas en una suspensión de sólidos de concentración muy baja. Las partículas se depositan como entidades individuales y no existe interacción significativa con las partículas más próximas. Un ejemplo típico es una suspensión de partículas de arena. Este tipo de sedimentación también se le conoce como **sedimentación libre**.

#### 1.3.1.3.2 SEDIMENTACIÓN DEL TIPO 2.

Se refiere a una suspensión diluida de partículas que se agregan, o flocculan durante la sedimentación.

Para determinar las características de sedimentación de una suspensión de partículas puede utilizarse una **columna de sedimentación**, en los cuales los orificios de muestreo deben colocarse a una distancia alrededor de 0.5 mt. La solución con materia

suspendida se introduce a la columna de tal modo que se produzca una distribución de los tamaños de las partículas en todo el tubo.

La temperatura durante el proceso es uniforme a lo largo de todo el ensayo, a fin de eliminar las corrientes de convección. La sedimentación deberá tener lugar en condiciones de reposo. A distintos intervalos de tiempo, se retiran las muestras de los orificios y se analizan para ver el número de sólidos en suspensión.

#### **1.3.1.3.3 SEDIMENTACIÓN ZONAL Y POR COMPRESIÓN.**

En los sistemas que tienen gran cantidad de sólidos en suspensión, además de los otros tipos de sedimentación (tipo 1 y 2), suele producirse una sedimentación zonal y por compresión. Debido a las características hidráulicas del flujo alrededor de las partículas y de las fuerzas interparticulares, aquellas depositan como una zona o "en capa", manteniéndose la posición relativa entre ellas. Conforme esta zona va sedimentando se produce un volumen de agua relativamente clara por encima de la región de sedimentación zonal, consiste en un escalonamiento de concentración de sólidos a partir de la hallada en la región de sedimentación del tipo 2 hasta que se encuentren la región comprimida.

A medida que se prosigue la sedimentación, comienza a formarse en el fondo del cilindro una capa de partículas comprimidas. Las partículas de esta región forman aparentemente una estructura en la que existe un contacto físico entre las mismas. Cuando se forma la capa de compresión, las regiones que tienen las concentraciones de sólidos cada vez menor que las halladas en la región de compresión se van desplazando hacia la parte superior.

#### **1.3.1.4 FLOTACIÓN.**

Una alternativa a la sedimentación, utilizada en el tratamiento de algunas aguas residuales, es **la flotación**, en la que se fuerza la entrada de aire en las mismas, a presiones de entre 1,75 y 3,5 Kg. por cm<sup>2</sup>. El agua residual, supersaturada de aire, se descarga a continuación en un depósito abierto. En él, la ascensión de las burbujas de aire hace que los sólidos en suspensión suban a la superficie, de donde son retirados. La flotación puede eliminar más de un 75% de los sólidos en suspensión.

#### **1.3.1.5 DIGESTIÓN.**

La digestión es un proceso microbiológico que convierte el cieno, orgánicamente complejo, en metano, dióxido de carbono y un material inofensivo similar al humus. Las reacciones se producen en un tanque cerrado o digestor, y son anaerobias, se producen en ausencia de oxígeno. La conversión se produce mediante una serie de reacciones. En primer lugar, la materia sólida se hace soluble por la acción de enzimas. La sustancia resultante fermenta por la acción de un grupo de bacterias productoras de ácidos, que la reducen a ácidos orgánicos sencillos, como el ácido acético. Entonces los ácidos orgánicos son convertidos en metano y dióxido de carbono por bacterias. Se

añade cieno espesado y calentado al digestor tan frecuentemente como sea posible, donde permanece entre 10 y 30 días hasta que se descompone. La digestión reduce el contenido en materia orgánica entre un 45 y un 60 por ciento.

#### **1.3.1.6. DESECACIÓN.**

El lodo digerido se extiende sobre lechos de arena para que se seque al aire. La absorción por la arena y la evaporación son los principales procesos responsables de la desecación. El secado al aire requiere un clima seco y relativamente cálido para que su eficacia sea óptima, y algunas depuradoras tienen una estructura tipo invernadero para proteger los lechos de arena. El lodo desecado se usa sobre todo como acondicionador del suelo; en ocasiones se usa como fertilizante, debido a que contiene un 2% de nitrógeno y un 1% de fósforo.

### **1.3.2. TRATAMIENTO SECUNDARIO.**

Una vez eliminados de un 40 a un 60% de los sólidos en suspensión y reducida de un 20 a un 40% la DBO<sub>5</sub> por medios físicos en el tratamiento primario, el tratamiento secundario reduce la cantidad de materia orgánica en el agua. Por lo general, los procesos microbianos empleados son aeróbicos o anaeróbicos, es decir, los microorganismos actúan en presencia de oxígeno disuelto o sin su presencia; según sea el caso. El tratamiento secundario supone, de hecho, emplear y acelerar los procesos naturales de eliminación de los residuos. En presencia de oxígeno (bacterias aeróbicas) y sin su presencia (bacterias anaeróbicas) convierten la materia orgánica en formas estables, como dióxido de carbono, agua, nitratos y fosfatos, así como otros materiales orgánicos. La producción de materia orgánica nueva es un resultado indirecto de los procesos de tratamiento biológico, y debe eliminarse antes de descargar el agua en el cauce receptor.

Hay diversos procesos alternativos para el tratamiento secundario, incluyendo el filtro de goteo, el lodo activado y las lagunas.

#### **1.3.2.1. FILTRO DE GOTEO.**

En este proceso, una corriente de aguas residuales se distribuye intermitentemente sobre un lecho o columna de algún medio poroso revestido con una película gelatinosa de microorganismos que actúan como agentes destructores. La materia orgánica de la corriente de agua residual es absorbida por la película microbiana y transformada en dióxido de carbono y agua. El proceso de goteo, cuando va precedido de sedimentación, puede reducir alrededor de un 85% la DBO<sub>5</sub>.

#### **1.3.2.2. LODO ACTIVADO.**

Se trata de un proceso aeróbico en el que partículas gelatinosas de lodo quedan suspendidas en un tanque de aireación y reciben oxígeno. Las partículas de lodo activado, llamadas **floc**, están compuestas por millones de bacterias en crecimiento activo aglutinadas por una sustancia gelatinosa. El floc absorbe la materia orgánica y la

convierte en productos aeróbicos. La reducción de la DBO<sub>5</sub> fluctúa entre el 60 y el 85 por ciento.

Un importante acompañante en toda planta que use cieno activado o un filtro de goteo es el clarificador secundario, que elimina las bacterias del agua antes de su descarga.

### **1.3.2.3 ESTANQUE DE ESTABILIZACIÓN O LAGUNA.**

Otra forma de tratamiento biológico es el estanque de estabilización o laguna, que requiere una extensión de terreno considerable y, por tanto, suelen construirse en zonas rurales. Las lagunas opcionales, que funcionan en condiciones mixtas, son las más comunes, con una profundidad de 0,6 a 1,5 m y una extensión superior a una hectárea. En la zona del fondo, donde se descomponen los sólidos, las condiciones son anaerobias; la zona próxima a la superficie es aeróbica, permitiendo la oxidación de la materia orgánica disuelta y coloidal. Puede lograrse una reducción de la DBO<sub>5</sub> de un 75 a un 85 por ciento.

### **1.3.2.4 TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS.**

Usan microorganismos que se nutren con diversos compuestos de los que contaminan las aguas. Los flóculos que se forman por agregación de microorganismos son separados en forma de lodos.

- ◆ **Lodos activos.-** Se añade agua con microorganismos a las aguas residuales en condiciones aerobias (burbujeo de aire o agitación de las aguas).
- ◆ **Filtros bacterianos.-** Los microorganismos están fijos en un soporte sobre el que fluyen las aguas a depurar. Se introduce oxígeno suficiente para asegurar que el proceso es aerobio.
- ◆ **Biodiscos.-** Intermedio entre los dos anteriores. Grandes discos dentro de una mezcla de agua residual con microorganismos facilitan la fijación y el trabajo de los microorganismos.
- ◆ **Lagunas aireadas.-** Se realiza el proceso biológico en lagunas de grandes extensiones.
- ◆ **Degradación anaerobia.-** Procesos con microorganismos que no necesitan oxígeno para su metabolismo

### 1.3.3 TRATAMIENTO AVANZADO DE AGUAS RESIDUALES

Muchas de las sustancias halladas en el agua residual se ven poco o nada afectadas por los procesos u operaciones y tratamientos convencionales. Estas sustancias van desde iones inorgánicos relativamente simples como el calcio, potasio, nitrato, sulfato y fosfato hasta un número creciente de compuestos complejos orgánicos sintéticos.

Aun el efecto de estas sustancias sobre el medio ambiente no se conoce bien, las exigencias de los tratamientos serán más rigurosas en lo que refiere a la concentración tolerable de muchas de estas sustancias en el efluente de las plantas.

En la siguiente tabla se verán algunos componentes químicos típicos que pueden hallarse en las aguas residuales y sus efectos.

Componente	Efecto	Concentración Crítica (mg/l)
Amoníaco	- Aumenta la demanda de cloro.	Cualquier cant.
	- Tóxico para los peces.	2.5
Cloruro	- Puede convertirse en Nitratos.	Cualquier cant.
	- Imparte un sabor salado.	250
Mercurio	- Interfiere en los procesos Industriales.	75-200
	- Tóxico para los seres humanos.	0.005
Sulfato	- Tóxico para la vida acuática.	0.005
	- Acción catártica.	1-3
Fosfato	- Estimula el crecimiento acuático de las algas.	0.015
Nitrato	- Interfiere en la coagulación.	0.2-0.4
	- Estimula el crecimiento acuático de las plantas.	0.3
Calcio y Magnesio	- Puede causar Metahemoglobina (niño azul).	10
	- Aumenta la dureza.	Mayor a 100

El tratamiento terciario o Avanzado es de gran interés hoy en día por la necesidad de obtener mejor calidad en las aguas, por estos motivos se presentaran algunos procesos utilizados con éxito en la actualidad o que parecen más prometedores o innovadores.

El tratamiento terciario, o de tercera fase, suele emplearse para eliminar el fósforo, mientras que el tratamiento avanzado podría incluir pasos adicionales para mejorar la calidad del efluente eliminando los contaminantes recalcitrantes. Hay procesos que permiten eliminar más de un 99% de los sólidos en suspensión y reducir la DBO5 en similar medida. Los sólidos disueltos se reducen por medio de procesos como la ósmosis inversa y la electro diálisis. La eliminación del amoníaco, la desnitrificación y la precipitación de los fosfatos pueden reducir el contenido en nutrientes. Si se pretende la reutilización del agua residual, la desinfección por tratamiento con ozono es considerada el método más fiable, excepción hecha de la cloración extrema.

<b>TRATAMIENTO AVANZADO DE AGUAS RESIDUALES</b>	<b>CONCEPTO</b>
<b>DESTILACIÓN</b>	Operación unitaria en la que los componentes de la solución líquida son separados mediante vaporización y condensación del líquido
<b>FRACCIONAMIENTO DE ESPUMAS</b>	Es la separación de la materia coloidal y suspendida por flotación y de la materia orgánica disuelta por adsorción. Cuando se burbujea aire en el agua residual se produce espuma o bien esta es inducida por productos químicos. Casi todos los compuestos orgánicos tienen actividad de superficie y estos tienden a concentrarse en la interfase gas-líquido y se eliminan junto con la espuma.
<b>CONGELACIÓN</b>	El agua es rociada en una cámara que funciona al vacío. Parte del agua residual se evapora y el efecto refrigerante produce cristales de hielo sin contaminantes en el líquido que queda. Seguidamente se extrae el hielo y se funde por calor de la condensación de los vapores de la fase de evaporación. En este procedimiento se ha utilizado Butano y otros refrigerantes.
<b>INTERCAMBIO IÓNICO.</b>	Proceso en que los iones que se mantienen unidos a grupos funcionales en la superficie del sólido por fuerzas electrostáticas se intercambian por especies diferentes en disolución. Ya que la desmineralización se puede llevar a cabo mediante intercambio iónico, es posible utilizar procesos de tratamientos de corriente continua, en el que parte del agua residual del efluente se desmineraliza y se combina después con parte del efluente que ha sido desviado del tratamiento para producir un efluente de calidad específica.
<b>VERTIDO DEL LÍQUIDO</b>	El proceso de tratamiento comprende los tratamientos convencionales primario y secundario, seguidos de una limpieza por cal para eliminar los compuestos orgánicos en suspensión. Durante este proceso, se crea un medio alcalino (pH elevado) para potenciar el proceso. En el paso siguiente se emplea la recarbonatación para volver a un pH neutro. A continuación se filtra el agua a través de múltiples capas de arena y carbón vegetal, y el amoníaco es eliminado por ionización. Los pesticidas y demás compuestos orgánicos aún en suspensión son absorbidos por un filtro granular de carbón activado. Los virus y bacterias se eliminan por ozonización. En esta fase el agua debería estar libre de todo contaminante pero, para mayor seguridad, se emplean la segunda fase de absorción sobre carbón y la ósmosis inversa y, finalmente, se añade dióxido de cloro para obtener un agua de calidad máxima.

<p><b>FOSA SÉPTICA.</b></p>	<p>Un proceso de tratamiento de las aguas residuales que suele usarse para los residuos domésticos es la fosa séptica: una fosa de cemento, bloques de ladrillo o metal en la que sedimentan los sólidos y asciende la materia flotante. El líquido aclarado en parte fluye por una salida sumergida hasta zanjas subterráneas llenas de rocas a través de las cuales puede fluir y filtrarse en la tierra, donde se oxida aeróbicamente. La materia flotante y los sólidos depositados pueden conservarse entre seis meses y varios años, durante los cuales se descomponen anaeróbicamente.</p>
<p><b>TRATAMIENTO ELECTROQUÍMICO.</b></p>	<p>En este proceso se mezcla el agua residual con agua de mar y se hace pasar célula simple que contiene electrodos de carbón. En razón de las densidades relativas del agua de mar y de la mezcla del agua de mar y residual, la primera se acumula en la superficie del ánodo en la parte inferior de la célula la última lo hace en la superficie del cátodo cerca de la parte superior de la célula. La corriente eleva el pH en el cátodo, precipitando con ello Fósforo y Amoníaco. Las burbujas de hidrogeno generadas en el cátodo elevan el fango a la superficie, donde es arrastrado y eliminado por métodos convencionales. El cloro desarrollado en el ánodo de la celda desinfecta el efluente y la mezcla sobrante de agua residual-de mar es seguidamente vertida al mar.</p>

## CAPITULO II

### TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE LAS AGUAS RESIDUALES

Los objetivos que persigue el tratamiento biológico del agua residual son la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica. En el caso de:

- ◆ Agua residual domestica, el principal objetivo es disminuir el contenido orgánico.
- ◆ Agua que ha de ser usada para fines agrícolas se pretende eliminar los nutrientes tales como el nitrógeno y el fósforo, que son capaces de estimular el crecimiento de plantas acuáticas.
- ◆ Aguas residuales industriales, la finalidad es reducir la concentración de compuestos orgánicos e inorgánicos.

Los procesos biológicos se clasifican según la dependencia del oxígeno por parte de los microorganismos fundamentalmente responsables del tratamiento de los residuos.

#### 2.1. ALGUNOS DE LOS TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS.

TIPO DE TRATAMIENTO	CARACTERISTICAS
<b>BIODISCOS.</b>	Se alojaran en varios depósitos de hormigón colocados en paralelo par poder realizar un proceso de Depuración en Serie y en varias Etapas. Los Biodiscos son como su nombre indica unos discos, generalmente de PVC, Polietileno o Polipropileno, que están girando parcialmente sumergidos en el agua residual y que sirven de soporte para que las colonias de bacterias se adhieran y formen una biomasa constante y confinada a una superficie determinada,
<b>LODOS ACTIVADOS.</b>	En el proceso de Lodos activados un residuo se estabiliza biológicamente en un reactor bajo condiciones aeróbicas. El ambiente aeróbico se logra mediante el uso de aireación por medio de difusores o sistemas mecánicos. Una vez que el agua residual ha sido tratada en el reactor, la masa biológica resultante se separa del liquido en un tanque de sedimentación y parte de los sólidos sedimentados son retornados al reactor.
<b>LAGUNAS AEROBIAS – ANAEROBIAS</b>	Las lagunas en las que se da la estabilización de aguas residuales mediante unas combinaciones de bacterias facultativas, aerobias y anaerobias, se conocen como lagunas o estanques de estabilización aerobios - anaerobios. Tales tanques tienen una capa aerobia superior y otra anaerobia inferior, ya en la práctica el oxígeno se mantiene en la capa superior debido a la presencia e algas o gracias al uso de aireadores de superficie, al existir este tipo de aireadores la presencia de las algas se vuelve innecesaria. La comunidad biológica en la capa

	superior es muy similar a la de una laguna aerobia, en tanto que los microorganismos de la capa inferior del estanque son bacterias facultativas y anaerobias.
<b>LECHOS BACTERIANOS</b>	Son tanques circulares rellenos de piedras o materiales sintéticos formando un filtro con un gran volumen de huecos, destinado a degradar biológicamente la materia orgánica del agua residual. El agua a tratar se rocía sobre el lecho filtrante, mediante un brazo giratorio, provisto de surtidores, y da lugar a la formación de una película que recubre los materiales filtrantes y que está formada por bacterias, protozoos y hongos alimentados por la materia orgánica del agua residual.
<b>LAGUNAS AIREADAS</b>	Estanque natural o artificial de tratamiento de aguas residuales en el cual se suple el abastecimiento de oxígeno por <i>aireación mecánica</i> o <i>difusión de aire comprimido</i> . Es una simplificación del proceso de lodos activados y según sus características, se distinguen cuatro tipos de lagunas aireadas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Laguna aireada de <i>mezcla completa</i>;</li> <li>• Laguna aireada <i>facultativa</i>;</li> <li>• Laguna <i>facultativa con agitación mecánica</i>;</li> <li>• Laguna de <i>oxidación aireada</i>.</li> </ul>

## 2.2. TRATAMIENTO AEROBIO DE LAS AGUAS RESIDUALES.

En el tratamiento aeróbico de las aguas residuales se incrementa fuertemente el aporte de oxígeno por riego de superficies sólidas, por agitación o agitación y aireación sumergida simultáneas. El crecimiento de los microorganismos y su actividad degradativa crecen proporcionalmente a la tasa de aireación. Las sustancias orgánicas e inorgánicas acompañantes productoras de enturbiamiento son el punto de partida para el desarrollo de colonias mixtas de bacterias y hongos de las aguas residuales, los flóculos que, con una intensidad de agitación decreciente, pueden alcanzar un diámetro de unos mm. Dividiéndose o hundiéndose después. La formación de flóculos se ve posibilitada por sustancias mucilaginosas extracelulares y también por las microfibrillas de la pared bacteriana que unen las bacterias unas con otras. El 40 – 50% de las sustancias orgánicas disueltas se incorporan a la biomasa bacteriana y el 50 – 60% de las mismas se degrada.

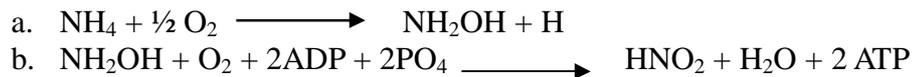
La acción degradativa o depuradora de los microorganismos en un proceso se mide por el porcentaje de disminución de la DBO en las aguas residuales tratadas. Dicha disminución depende de la capacidad de aireación del proceso, del tipo de residuos y de la carga de contaminantes de las aguas residuales y se expresa así mismo en unidades de DBO.

En las aguas residuales con una composición heterogénea, la microflora se reparte equitativamente entre muchos grupos bacterianos.

Tras la depuración biológica, las aguas residuales contienen compuestos orgánicos, fosfatos y nitratos disueltos que solo se degradaran ya lentamente. Los nitratos se forman por oxidación del amonio desprendido en la degradación de compuestos

orgánicos nitrogenados. Esta es una tarea de las bacterias Nitrificantes, uno de cuyos grupos esta reprensado en las aguas residuales principalmente por Nitrosomonas y Nitrospira, que únicamente llevan a cabo la reacción de oxidación del amonio a nitrito para obtener energía metabólica, mientras que un segundo grupo de bacterias, que aparece siempre junto al ya citado y que esta reprensado por Nitrobacter, oxida el nitrito a nitrato y obtiene energía gracias exclusivamente a este proceso:

**Oxidación del amonio:**



**Oxidación del nitrito:**



Otros microorganismos que también intervienen en el tratamiento aerobio de aguas residuales son: Citrobacter, Serratia, mohos y levaduras que actúan mas de componentes acompañantes que de degradantes y algunas algas como Anabaena que convierte los poliuretanos en H<sub>2</sub>; Chrorella los alginatos los convierte en glicolato; Dulaniella los alginatos en glicerol; Nostoc el agar el H<sub>2</sub>; Algas como el Volvox, Tabellaria, Anacistis y Anabaena; las algas que obstruyen los filtros son Anacistis, Chorella, Anabaena y Tabellaria.

**2.3. IMPORTANCIA DE LOS MICROORGANISMOS Y BACTERIAS**

Para proyectar correctamente el sistema de lodos activados es ver la importancia de los microorganismos dentro del sistema. En la naturaleza, el papel clave de las bacterias es el de descomponer la materia orgánica producida por otros organismos vivientes. En el proceso de lodos activados, las bacterias son los microorganismos más importantes, ya que estos son la causa de descomposición de la materia orgánica del efluente. En el reactor parte de la materia orgánica del agua residual es utilizada por las bacterias aeróbicas con el fin de obtener energía para la síntesis del resto de la materia orgánica en nuevas células.

Otro tipo de microorganismos igualmente de importantes son los protozoos y rotíferos que actúan como depurificadores de los efluentes. Los protozoos consumen las bacterias dispersas que no han floculado y los rotíferos consumen partículas biológicas que no hallan sedimentado.

En realidad solo parte del residuo original es verdaderamente oxidado a compuestos de bajo contenido energético tales como el NO<sub>3</sub><sup>-2</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> y CO<sub>2</sub>; el resto es sintetizado en materia celular.

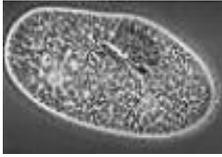
### 2.3.1. BACTERIAS.

Las bacterias, son organismos unicelulares, simples y sin color, que utilizan los nutrientes para su propia reproducción sin la necesidad de energía solar. Son Bio-reductores y su papel ecológico indispensable para la degradación de materia orgánica permite la estabilización de residuos orgánicos existentes en las plantas de tratamiento.

Existen además en los lodos activos, un gran numero de especies de protozoos como flagelos-, ciliados- y amebas. Los protozoos son organismos de una célula que puede nutrirse de materia orgánica y bacterias. Nematodos o rotíferos se clasifican entre los organismos multicelulares.

Son responsables de el crecimiento de los lodos activos en plantas domesticas de tratamiento de aguas. Se puede encontrar una gran variedad de bacterias:

BACTERIA	CONCEPTO.
<b>Spirillum</b> 	Bacterias móviles helicoidales con forma de bacilos largos y espiralados (Spirobacterias). Habitan medios con baja concentración de oxígeno disuelto.
<b>Vitreoscilla</b>	Género de Gram.-negativas, aeróbicas o microaerofilicas, no tienen color y son filamentosas. Se mueven por desplazamiento. Son estrictamente aeróbicas y producen hemoglobina bacteriana, especialmente bajo condiciones de crecimiento con limitación de oxígeno.
<b>Sphaerotilus</b>	Una bacteria filamentososa forrada que exhibe una "falsa" ramificación. Se pensó que era la mayor responsable de la mayoría de episodios de agrupamiento en el nadante, pero sin embargo en la actualidad se han encontrado de manera infrecuente. Están asociadas a la limitación de nutrientes; no existen en plantas con zonas anóxicas.
<b>Beggiatoa</b> 	Bacteria filamentososa del sulfuro constituida por filamentos rectos, activamente móviles por deslizamiento y a partir de pequeñas sacudidas. Habitualmente presentan acumulaciones de azufre, en forma de gránulos esféricos o filamentosos, y dominan las comunidades microbianas asociadas a los sedimentos marinos. Parecen blancas debido al reflejo de la luz en las inclusiones de sulfuro. El tamaño varía entre milímetros a varios milímetros.
<b>Zoogloea</b> 	Una colonia o mas de bacterias sostenida en sustancias viscosas y gelatinosas. La zoogloea es característica en etapas transitorias en las que bacterias de crecimiento rápido pasan a otro curso dentro de su evolución.

<p><b>Paramecium</b></p> 	<p>Carecen de flagelos, pero los cilios son muy abundantes y recubren toda su superficie. A ellos les corresponde proporcionar movimiento al organismo. La membrana externa absorbe y expulsa regularmente el agua del exterior con el fin de controlar la osmorregulación, proceso dirigido por dos vacuolas contráctiles.</p>
<p><b>Nematodo</b></p> 	<p>Lo más eficaz es <b>desinfectar el suelo antes de plantar si se sospecha que está infectado de Nematodos</b>. Hay compuestos desinfectantes a base de Dazomet, Oxamilo o Etoprofos. En cultivo también pueden adicionarse al suelo Nematicidas. Materias activas son: Aldicarb, Carbofurano o Fenamifos (este último te lo recomiendo mejor).</p>
<p><b>Rotifer</b></p> 	<p>Formas más complejas que los protozoarios se alimentan de éstos y forman parte de la cadena alimenticia de la biomasa presente en el lodo activado.</p>
<p><b>Ciliate</b></p> 	<p>En el flóculo, los <b>ciliados reptantes</b> llevan a cabo la eliminación de bacterias de la superficie mediante su ingesta, a la vez que mejoran la oxigenación gracias a su desplazamiento sobre el floculo, favoreciendo la transferencia de oxígeno a las zonas interiores. Los <b>ciliados sésiles</b> contribuyen a dar consistencia al flóculo, mejorando su decantabilidad y disminuyendo con su alimentación el número de bacterias dispersas libres en el espacio interflocular.</p>

El agua es el componente principal de los lodos. El contenido en agua depende del tipo de lodo (primario, secundario o terciario) y del tipo de estabilización (aeróbica o anaeróbica).

### 2.3.2. MICROBIOLOGÍA.

La Microbiología Industrial trata de utilizar microorganismos para que produzcan compuestos o realicen funciones que sean útiles desde un punto de vista aplicado. Comprende el cultivo de microorganismos para su propia producción como alimento y para la producción y transformación de materia orgánica, y desechos industriales y urbanos.

#### 2.3.2.1. TIPOS DE ORGANIZACIÓN CELULAR.

Los seres vivos pueden agruparse en tres grandes grupos que se separaron en épocas evolutivas muy antiguas: bacterias, arqueas y eucarias. Bacterias y arqueas presentan un

tipo de organización celular conocida como procariótica porque en ellas el material genético no está separado del resto del citoplasma por una membrana nuclear (son células sin núcleo), mientras que los organismos pertenecientes al grupo de eucaria presentan un núcleo diferenciado del resto de la célula y, por tanto, su organización celular se denomina eucariótica.

### **2.3.2.2 ESTRUCTURA DE LA PARED CELULAR**

La estructura de la pared celular de las bacterias permite distinguir dos grandes grupos: las bacterias Gram.-positivas y las bacterias Gram.-negativas (cuya pared celular tiene dos membranas ligeramente diferentes que delimitan un espacio periplásmico en el que se encuentra una delgada capa de peptidoglicano, y que presentan lipopolisacáridos en el exterior)

Las células eucarióticas pueden tener pared que recubra su membrana. Esto ocurre en los hongos y en las plantas. Sin embargo, la estructura de esta pared es diferente a la de las bacterias. Una diferencia esencial es que los eucariontes no tienen peptidoglicano en su pared celular.

### **2.3.2.3 MEMBRANAS BIOLÓGICAS.**

Las membranas biológicas son unas estructuras esenciales para el mantenimiento de la integridad celular y para el correcto funcionamiento de los procesos biológicos. Desempeñan dos funciones esenciales: son barreras de permeabilidad que separan diferentes compartimentos celulares son un soporte que permite mantener ordenados los componentes celulares para que puedan funcionar correctamente.

Las barreras de permeabilidad permiten mantener concentraciones diferentes de iones o moléculas a ambos lados de una membrana biológica. Esta diferencia de concentraciones (que se suele denominar *gradiente de concentración*) da lugar a la existencia de una energía potencial que puede ser transformada en la energía química necesaria para el funcionamiento de los procesos biológicos.

Por tanto, los agentes químicos que destruyen las membranas biológicas son letales para las células ya que destruyen los gradientes que son la base de muchos procesos biológicos y desordenan los componentes celulares al destruir el soporte en el que se encuentran.

### **2.3.2.4. METABOLISMO MICROBIANO.**

Llamamos metabolismo al conjunto de reacciones de un organismo. Para los microorganismos con los que vamos a trabajar, normalmente quimiohetero-(organo)-trofos, podemos hacer el siguiente esquema general del metabolismo:

Los microorganismos son sistemas que necesitan una gran cantidad de energía para mantenerse ordenados. Esta energía se obtiene de la oxidación de compuestos orgánicos

reducidos. Los nutrientes proporcionan esos compuestos reducidos y, en el curso de la oxidación, se libera energía (que se acumula en forma de moléculas almacenadoras de energía, especialmente el ATP) y se producen elementos estructurales que servirán para la construcción de nuevas células (crecimiento y diferenciación).

Al proceso por el que se obtiene energía y elementos estructurales básicos a partir de nutrientes se le denomina catabolismo y al que utiliza la energía obtenida en el catabolismo para sintetizar nuevos componentes celulares se le denomina anabolismo. Es importante tener en cuenta que aunque se estudie de forma separada el anabolismo y el catabolismo, ambos tipos de procesos ocurren simultáneamente de forma que conforme se van produciendo elementos estructurales y energía en el catabolismo, esos elementos se usan para formar nuevos componentes celulares en procesos anabólicos.

A los productos metabólicos generados durante el catabolismo y el anabolismo que tiene lugar durante el crecimiento (trofofase) se les denomina metabolitos primarios y su producción es paralela al crecimiento celular. Por el contrario, los productos metabólicos que se acumulan cuando no hay crecimiento sino diferenciación celular (idiofase), se les denomina metabolitos secundarios. En general, puede decirse que los metabolitos secundarios se producen después de que se han producido los primarios; aunque en ciertas condiciones (como en cultivo continuo) se pueden producir simultáneamente.

Es conveniente considerar el metabolismo como un flujo de materia reducida que puede oxidarse para la producción de energía o utilizarse para la biosíntesis de nuevos elementos estructurales. No todo el carbono presente en los nutrientes va a oxidarse completamente ya que parte se utilizará para sintetizar nueva biomasa. Por otra parte, no todo el carbono de los nutrientes se utiliza para la producción de biomasa y, por consiguiente, el rendimiento es siempre inferior a la unidad (en torno al 50% en muchos casos).

La oxidación de los nutrientes consiste en la capitación de electrones de un compuesto reducido por parte de un agente oxidante que llamaremos aceptor final de electrones.

Este aceptor final puede ser inorgánico: oxígeno (con  $\Delta G^{0\prime} = -237$  kJ) o  $\text{NO}_3^-$  con  $\Delta G^{0\prime} = -163$  kJ; o compuestos orgánicos tales como el fumarato con  $\Delta G^{0\prime} = -86$  kJ. Cuanto más negativo sea el valor de  $\Delta G^{0\prime}$ , mayor cantidad de energía se podrá obtener de la oxidación y más eficiente será el proceso. Por esto, puede verse que la oxidación en la que el aceptor final de electrones es el  $\text{O}_2$  es la que más rendimiento de producción de energía permite.

El esquema general del metabolismo se construye en torno al proceso de oxidación de la glucosa. La ecuación general de oxidación de la glucosa es la siguiente:



### 2.3.2.5 CRECIMIENTO CELULAR.

Es importante conocer la cinética de crecimiento de los cultivos microbianos porque es necesario poder predecir cómo va a evolucionar un cultivo, cómo va a ir consumiéndose el sustrato y cómo se va a ir acumulando el producto de una fermentación.

El tiempo que tarda una célula en hacer todo lo anterior es lo que conocemos como *tiempo de generación* y puede variar desde unos 20 minutos en condiciones óptimas

hasta varios meses en condiciones del suelo. Cada vez que transcurre un tiempo de generación, el número de células se duplica, siguiendo, por tanto, un incremento exponencial.

Si llamamos $N_0$ al número de células inicial, y $g$ al número de generaciones transcurridas, el número de células final ( $N$ ) será: el número de células final.	$N = N_0 2^g$
Llamando $T$ al tiempo de generación y $t$ al tiempo de cultivo transcurrido, la ecuación anterior puede transformarse en la siguiente:	$N = N_0 2^{t/T}$

Las ecuaciones exponenciales son muy difíciles de manejar gráficamente, por ello es mejor transformarlas en algo más simple, como puede ser una recta.

Para transformar las ecuaciones anteriores en una recta, tomamos logaritmos en los dos términos y resulta:	$\ln N = \ln N_0 + \frac{t}{T} \ln 2$
--	---------------------------------------

Esto es: el logaritmo del número de células crece linealmente con el tiempo a razón de una constante igual a  $\ln 2/T$ . Si el tiempo de generación  $T$  es muy grande, el crecimiento tendrá poca pendiente (será lento) y si  $T$  es pequeño el crecimiento será rápido.

En un crecimiento equilibrado, todos los parámetros de crecimiento evolucionan en paralelo. Esto es: el incremento en el número de células, en la biomasa de cultivo y en la acumulación de metabolitos primarios, proteínas, ácidos nucleicos etc., es paralelo. Por tanto, en la ecuación anterior  $N$  puede representar cualquiera de estos factores.

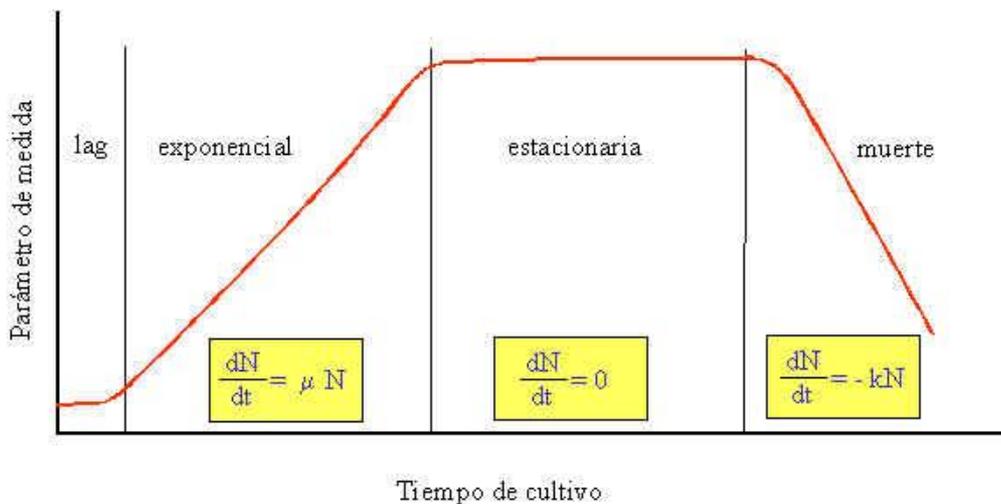
Otra forma de representar la cinética es considerando el incremento en el número de células ( $dN$ ) en un intervalo corto de tiempo ( $dt$ ). En este caso, la ecuación que describe la cinética es la siguiente:	$\frac{dN}{dt} = \mu N$
--	-------------------------

El incremento del número de células ( $dN$ ) por unidad de tiempo ( $dt$ ) es proporcional al número de células presentes en el cultivo ( $N$ ). A la constante de proporcionalidad ( $\mu$ ) se le denomina **tasa de crecimiento** y puede considerarse algo así como la probabilidad de que una célula se divida en un tiempo determinado.

Integrando la ecuación anterior durante el tiempo de cultivo, se transforma en la siguiente función exponencial:	$N = N_0 e^{\mu t}$
la transformación de esta ecuación en una recta (tomando logaritmos) rinde lo siguiente:	$\ln N = \ln N_0 + \mu t$

El incremento del logaritmo del número de células aumenta linealmente con el tiempo siendo la constante de proporcionalidad  $\mu$ . Comparando esta ecuación con la similar presentada más arriba, podemos concluir que  $\mu = \ln 2/T$  y, por consiguiente, que  $T = \ln 2/\mu$ . Es decir, que hay una correlación inversa entre el valor de la tasa de crecimiento ( $\mu$ ) y el tiempo de generación.

Estas ecuaciones nos permiten predecir cuál será el número de células, masa celular, etc. después de un cierto tiempo de cultivo ( $t$ ) si conocemos  $\mu$ ; o bien, poder calcular la tasa de crecimiento  $\mu$  a partir de medidas experimentales del incremento en el número de células, biomasa, etc.



El gráfico representa la variación de la biomasa de un cultivo a lo largo del tiempo. En este cultivo, se va consumiendo un sustrato cuya concentración decrece de forma proporcional al crecimiento de la biomasa.

Donde  $dS$  indica la variación de la concentración del sustrato. Al valor  $Y_s$  lo denominamos rendimiento de utilización del sustrato, ya que mide la cantidad de biomasa que puede producirse por unidad de sustrato consumido:

$$Y_s = \frac{dN}{dS}$$

El rendimiento de utilización de diferentes sustratos puede ser diferente (hay sustratos, o alimentos, que "engordan" más que otros), varía entre diferentes microorganismos y varía también en función de otras condiciones ambientales o fisiológicas. También varía el rendimiento en función de que el metabolismo sea oxidativo o fermentativo.

Podemos calcular el rendimiento de la utilización del sustrato en función de la cantidad de sustrato añadido al cultivo, o en función de la cantidad de carbono presente en ese sustrato.

<p>Haciendo las transformaciones que se indican a la derecha sobre la fórmula que relaciona la variación de biomasa con la de sustrato, llegamos a la definición de un nuevo concepto <math>q_s</math> denominado <i>tasa específica de consumo de sustrato por el organismo</i>.</p>	$\frac{dN}{dt} = -Y_s \frac{dS}{dt}$ $\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = -Y_s \frac{dS}{dt} \frac{1}{N}$ $\mu = Y_s q_s$
---	---

La tasa específica de consumo de sustrato la podemos considerar la "velocidad" con la que el organismo consume el sustrato. Evidentemente, cuanto mayor sea la tasa de consumo mayor será la velocidad de crecimiento ( $\mu$ ). Asimismo, cuanto mayor sea el rendimiento del sustrato consumido, también mayor será la tasa de crecimiento. Sin embargo, hay una cierta compensación entre la tasa de consumo del sustrato y el rendimiento de forma que los microorganismos que tienen altas tasas de consumo de sustrato tienen rendimientos más bajos. A esta correlación inversa se le conoce con el nombre de *efecto Pasteur*.

Por último, nos falta relacionar la tasa de crecimiento ( $\mu$ ) con la concentración de sustrato (S). En condiciones de sustrato abundante, la concentración de este no afecta al valor de  $\mu$ ; pero cuando el sustrato se hace limitante, sí existe ese efecto. La expresión matemática que relaciona ambos parámetros se conoce con el nombre de *ecuación de Monod* y es la siguiente:

$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_s + S}$	<p>En esta ecuación la tasa de crecimiento (<math>\mu</math>) depende de la máxima que puede alcanzar el microorganismo, de la concentración de sustrato y de un valor <math>K_s</math> que representa la concentración de sustrato a la que se alcanza una tasa de crecimiento igual a la mitad de la máxima.</p>
--------------------------------------	--

La ecuación de Monod tendrá mucha importancia al tratar de cultivos continuos. Para que se cumpla esta ecuación el rendimiento debe ser independiente de la concentración de sustrato.

### **2.3.3. FACTORES AMBIENTALES QUE AFECTAN AL CRECIMIENTO**

Si no se encuentra uno de estos factores dentro de lo especificado las bacterias reducirían su eficiencia, quedarían inactivas o morirían.

#### **2.3.3.1. APLICACIÓN DE LA TEMPERATURA EN MICROORGANISMOS.**

Un aspecto aplicado muy importante de la temperatura es su utilización para la esterilización por calor. Entonces podemos ver que las altas temperaturas pueden afectar al crecimiento bacteriano, incluso llegar a matar las bacterias si la temperatura llega a ser demasiado alta.

#### **2.3.3.2. REFRIGERACIÓN.**

Los microorganismos se comportan a bajas temperaturas de forma diferente según se trate de condiciones de refrigeración o de congelación.

**En condiciones de refrigeración** los microorganismos mesófilos y termófilos detienen su crecimiento ( $\mu=0$ ) y se mantienen durante largo tiempo sin morir. Los psicrófilos y psicrótrofos pueden crecer en estas condiciones y llegar a producir poblaciones importantes.

**En condiciones de congelación**, la formación de cristales en el interior de las células produce unas altas mortalidades que reducen el tamaño de la población. En el momento de la congelación se produce la muerte rápida de muchos microorganismos y, a tiempos más largos, la tasa de muerte se reduce aunque el número de viables sigue disminuyendo.

La tolerancia a la congelación de diferentes microorganismos puede variar.

#### **2.3.3.3. PH**

Es un parámetro crítico en el cultivo de microorganismos ya que estos sólo pueden crecer en un rango estrecho de pH fuera del cual mueren rápidamente. El pH intracelular es ligeramente superior al del medio que rodea las células ya que, en muchos casos, la obtención de energía metabólica depende de la existencia de una diferencia en la concentración de protones a ambos lados de la membrana citoplásmica.

- ◆ Cada tipo de microorganismo tiene un rango de pH en el que puede vivir adecuadamente, fuera de este rango muere.
- ◆ Los rangos de pH tolerables por diferentes tipos de microorganismos son, también, distintos. Hay microorganismos acidófilos que pueden vivir a  $\text{pH}=1.0$  y otros alcalófilos que toleran  $\text{pH}=10.0$
- ◆ El pH interno en la mayoría de los microorganismos está en el rango de 6.0 a 7.0.

Por otra parte, la bajada del pH del medio que producen ciertos microorganismos les confiere una ventaja selectiva frente a otros microorganismos competidores. Así, por ejemplo, las bacterias lácticas que producen grandes cantidades de ácido láctico como consecuencia de su metabolismo primario reducen el pH del medio de cultivo a valores inferiores a los soportables por otras bacterias competidoras. De esta forma, las bacterias competidoras mueren y las lácticas se convierten en la población dominante.

La bajada del pH se puede deber a varios factores, uno de los cuales es la liberación de ácidos orgánicos de cadena corta (fórmico, acético, láctico) por ciertas bacterias.

En resumen, es necesario controlar el pH de los cultivos y de las fermentaciones industriales para que se mantenga en los niveles adecuados para el crecimiento y metabolismo correcto del microorganismo con el que se trabaja.

#### 2.3.3.4. POTENCIAL REDOX, CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO

Este es otro factor determinante del crecimiento y del metabolismo del cultivo.

El potencial redox del medio de cultivo nos indica su capacidad para aceptar o donar electrones, esto es: sus características oxidantes o reductoras. Uno de los factores que intervienen en el potencial redox, aunque no el único, es la concentración de oxígeno.

Hay microorganismos que requieren ambientes oxidantes para crecer, mientras que otros necesitan ambientes reductores. El metabolismo de ambos tipos de microorganismos presenta diferencias notables como veremos más adelante. El requerimiento de condiciones oxidantes o reductoras no debe confundirse con la necesidad de presencia o ausencia de oxígeno para que se produzca el crecimiento.

- En general, cuando un microorganismo requiere un ambiente oxidante se dice que desarrolla un **metabolismo oxidativo** (o **respirativo**) mientras que los microorganismos que requieren ambientes reductores (o menos oxidantes) realizan un **metabolismo fermentativo**.
- Un microorganismo es aerobio cuando necesita oxígeno para vivir y es anaerobio cuando no lo necesita o cuando muere en presencia de oxígeno.
- Hay microorganismos que viven en ambientes carentes de oxígeno (anaerobios) que, sin embargo, llevan a cabo un metabolismo oxidativo porque usan otro aceptor final de electrones que actúa como oxidante ambiental. Por ejemplo, las bacterias que "respiran" nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).
- Hay microorganismos que, aunque viven en presencia de oxígeno, no son capaces de utilizarlo como aceptor final de electrones y deben desarrollar un metabolismo fermentativo (las bacterias lácticas, por ejemplo).
- Por otra parte, hay microorganismos que pueden desarrollar ambos tipos de metabolismo. Esto es: en presencia de oxígeno desarrollan un metabolismo oxidativo y en su ausencia, fermentativo. El rendimiento (Ys) de los procesos fermentativos es menor que el de los respirativos: las bacterias y las levaduras

producen menos biomasa cuando crecen fermentando que cuando lo hacen respirando.

En el curso de ciertas reacciones metabólicas redox se forman compuestos altamente reactivos que pueden dañar las proteínas, membranas y ácidos nucleicos produciendo la muerte de las células. Estas formas reactivas son un subproducto del metabolismo respirativo.

#### **2.3.3.5. RADIACIÓN.**

Las radiaciones ultravioleta (uv), Rayos X y radiación  $\gamma$  producen efectos esterilizantes (destrucción de microorganismos) al alterar las proteínas, membranas, ácidos nucleicos y al generar radicales libres del tipo  $\text{OH}^\bullet$  y  $\text{H}^\bullet$ . Aquí en esta parte es parecida a las altas temperaturas. Hay que considerar, sin embargo, los poderes de penetración de los diferentes tipos de radiación.

## **CAPITULO III**

### **TRATAMIENTO ANAEROBIO DE LAS AGUAS RESIDUALES.**

El tratamiento anaeróbico de las aguas residuales supone la descomposición de la materia orgánica y/o inorgánica en ausencia de oxígeno molecular. La mayor aplicación se halla en la digestión de los lodos de aguas residuales una vez concentrada, así como parte de residuos industriales.

Consiste en una serie de procesos microbiológicos, dentro de un recipiente hermético, dirigidos a la digestión de la materia orgánica con producción de metano. Es un proceso en el que pueden intervenir diferentes tipos de microorganismos pero que está dirigido principalmente por bacterias. Presenta una serie de ventajas frente a la digestión aerobia: generalmente requiere de instalaciones menos costosas, no hay necesidad de suministrar oxígeno por lo que el proceso es más barato y el requerimiento energético es menor.

Por otra parte se produce una menor cantidad de lodo (el 3% en comparación con un sistema de lodos activos), y además este último se puede disponer como abono y mejorador de suelos. Además es posible producir un gas útil.

El modo más usual de operar de una instalación de tratamiento anaeróbico de lodos o concentrado es la utilización de un reactor de mezcla completa y mínima recirculación celular cuyo objeto es el calentamiento contenido en el tanque. El tiempo de retención del líquido del reactor oscila entre los 10 y 30 días, incluso más, según opere el sistema. La velocidad de carga orgánica máxima de un proceso anaerobio está limitada por el tiempo de retención y por la actividad de los microorganismos implicados en los mecanismos bioquímicos de degradación de la materia orgánica. Puesto que las bacterias formadoras de metano tienen una velocidad de crecimiento baja, la retención de la biomasa activa es la clave de la operación de los reactores anaerobios avanzados, que permiten operar con bajos tiempos de retención hidráulicos (TRH) y elevados tiempos de retención de sólidos (TRS).

Todas las técnicas actualmente utilizadas se basan en la propiedad de las bacterias de formar flocules por unión con otras bacterias, o de adherirse sobre superficies sólidas. En este sentido, las técnicas de retención de los microorganismos en el reactor pueden ser:

- ◆ Sedimentación interna.
- ◆ Sedimentación externa y recirculación.
- ◆ Inmovilización sobre superficies sólidas. Con respecto a la actividad de los microorganismos, puede conseguirse un comportamiento óptimo mediante: Eliminación de depósitos de material inerte. La mayor parte de las aguas residuales contienen sólidos inertes no degradables cuya acumulación en el digestor hace descender la concentración de la biomasa activa. Este problema puede resolverse utilizando una etapa previa de separación de estos materiales.

- ◆ Disminución de las limitaciones relacionadas con el fenómeno de difusión. La actividad de los organismos puede estar limitada por la difusión del sustrato. Es proceso de difusión externo se incrementa mediante una adecuada agitación que facilite el contacto bacteria / sustrato. La difusión interna, a través de la capa de microorganismos que forman floculos o película adherida, se facilita utilizando espesores de biocapa inferiores a 1 mm.

### **3.1. Aplicación de procesos en varias etapas.**

Los diferentes tipos de procesos de tratamiento anaerobio son:

#### **3.1.1 Reactores monoetapa en los que la biomasa bacteriana no se encuentra soportada,**

- a. Reactor sin calentamiento y sin mezcla.
- b. Reactor de mezcla continua (CSTR).
- c. Reactor primario + secundario.
- d. Reactor de contacto.
- e. Reactor de lecho suspendido (UASB).

#### **3.1.2. Reactores monoetapa en los que la biomasa bacteriana se encuentra inmovilizada o soportada.**

- a. Filtro anaerobio,
- b. Contactor biológico rotativo anaerobio (AnRBC).
- c. Reactor de contacto con material de soporte (CASBER).
- d. Reactores híbridos,
- e. Reactores de lecho móvil.
  - \* Reactor de lecho expandido (AAFEB),
  - \* Reactor de lecho fluidizado (AAFFB).

#### **3.1.3. Reactores multietapas.**

- a. Reactores en paralelo.
- b. Reactores en serie.
- c. Reactores con separación de fases.

3.2. <b>TIPO DE TRATAMIENTO</b>	<b>CARACTEREISTICAS DEL TRATAMIENTO</b>
<b>REACTOR SIN CALENTAMIENTO Y SIN MEZCLA.</b>	Este digester es un gran tanque de almacenamiento, donde no existe ningún elemento capaz de acelerar el proceso. La llegada del influente se realiza intermitentemente. Se trata, por lo tanto, de un reactor de alimentación semicontinua. La mezcla o agitación en el interior del digester la llevan a cabo las burbujas de biogás producido en el proceso, en su camino ascendente hacia la superficie. Esta pequeña agitación da lugar a una estratificación en el interior del digester.
<b>REACTOR DE MEZCLA CONTINUA (CSTR)</b>	Son reactores relativamente simples, calentados, de mezcla completa y sin recirculación de parte del influente digerido. En este caso, el TRH es también igual al TRS. Para un tratamiento efectivo del influente, este tipo de reactores requiere largos TRH, ya que carecen de medios específicos de retención de la biomasa activa. Con la reducción del TRH en un digester de mezcla completa, la cantidad de microorganismos dentro del digester también disminuye, ya que son lavados con el efluente.
<b>REACTOR PRIMARIO MÁS SECUNDARIO</b>	Un digester de mezcla completa (digester primario) puede estar acoplado en serie con un segundo tanque de digestión (digester secundario). Tradicionalmente, este segundo tanque es de un diseño similar al primario, y se diferencia de éste en que no lleva equipos de agitación ni de calentamiento. La principal misión de esta segunda unidad es la de concentrar el influente digerido y eliminar el líquido sobrenadante. Con esto se consigue disminuir el volumen de lodo que se envía a los siguientes procesos de tratamiento.
<b>REACTOR DE CONTACTO</b>	Este proceso comprende la alimentación continua de un reactor de mezcla completa seguido de un clarificador o separador sólido/líquido. Parte del lodo digerido y sedimentado se recircula al digester, donde se mezcla con el influente no digerido. La reinoculación de una biomasa bien aclimatada permite mantener óptimas condiciones de funcionamiento del proceso, sobre todo en aguas residuales industriales. Estas a diferencia de las urbanas, no contienen generalmente una alta proporción de m microorganismos
<b>FILTRO ANAEROBIO.</b>	En un sistema de filtro anaerobio la biomasa bacteriana se encuentra, en parte, inmovilizada en un material de soporte fijo en el reactor biológico, y en parte en suspensión entre los espacios vacíos que restan. El flujo del influente es normalmente vertical, bien ascendente o bien descendente, y el propio material de relleno actúa como separador de gas, que se recoge en la parte superior, proporcionando zonas de reposo para la sedimentación de los sólidos que se encuentran en suspensión. El filtro anaerobio es aconsejable para aguas residuales con carga orgánica moderada soluble.
<b>CONTACTORES BIOLÓGICOS ROTATIVOS ANAEROBIOS (AnRBC).</b>	La biomasa bacteriana se encuentra soportada sobre un material inerte, configurado a modo de discos paralelos (Biodiscos), de jaulas cilíndricas rellenas de diversos materiales (biocilindros), o tambores recorridos internamente por canales (biorrotos). Estos dispositivos se encuentran total o casi totalmente sumergidos, rotando continuamente sobre un eje horizontal, en un tanque cerrado a través del cual fluye el agua residual. La rotación continuada permite la mezcla dentro del tanque y facilita la transferencia del biogás producido a la zona superior del tanque.
<b>REACTOR DE CONTACTO CON MATERIAL DE SOPORTE (CASBER).</b>	Este proceso es esencialmente idéntico al contacto interno, con la incorporación de un material inerte en el digester. Las partículas utilizadas suelen tener un diámetro entre 5 y 25 mm, tienen una baja velocidad de sedimentación y, por lo tanto, pueden mantenerse en suspensión con un bajo grado de agitación. Un pequeño porcentaje de bacterias es soportado en estas partículas, que pueden ser arenas, plásticos, etc., mientras que un porcentaje sustancial de la biomasa activa permanece como flóculos en suspensión.
<b>REACTORES HÍBRIDOS.</b>	En los últimos años se ha desarrollado un tipo de reactores que combina características del sistema de lecho suspendido y del filtro anaerobio de flujo ascendente. La parte correspondiente a éste último comprende el tercio superior del reactor y su función más importante no es tanto el aumento en el rendimiento de la operación como la posibilidad de retención de la biomasa. De esta manera se trata de sumar las ventajas del reactor UASB (altas cargas

	y simplicidad) con las del filtro anaerobio (altas cargas y resistencia a las sobrecargas).
<b>REACTORES DE LECHO MÓVIL.</b>	El tratamiento biológico efectivo de aguas residuales requiere de sistemas que aseguren un amplio rango de tolerancia a fluctuaciones en las condiciones de operación. Esto hace que los procesos de película fija se consideren, en general, más resistentes que otros sistemas alternativos a cambios en los parámetros de operación del proceso por su capacidad para retener la biomasa.
<b>REACTORES DE LECHO EXPANDIDO.</b>	La mayor parte de las ventajas atribuibles a este sistema derivan de la elevada concentración de biomasa activa sobre las partículas de soporte y las elevadas tasas de recirculación, lo que hace al digestor menos sensible a componentes tóxicos del influente. De ahí el interés de su uso en el tratamiento de aguas residuales industriales de diversos tipos.
<b>REACTORES DE LECHO FLUIDIZADO</b>	En este caso la elevada velocidad ascensional (6 - 20) m/h expande el lecho hasta un punto en el que la fuerza de gravedad y la fuerza de rozamiento se igualan. Para esto se necesita una elevadísima tasa de recirculación del influente y las partículas de soporte no tienen una posición fija dentro del lecho, si bien se mantienen dentro de un volumen restringido.
<b>REACTORES MULTIETAPA.</b>	Los sistemas multietapa han demostrado ser de extraordinaria aplicación en el tratamiento de determinadas aguas residuales industriales, ya que permiten variar los tiempos de retención en los distintos digestores, reducir el tiempo de arranque y las pérdidas de biomasa, así como aumentar la capacidad del tratamiento y los rendimientos. Los sistemas multietapa en fase presenta una gran ventaja se puede separa en digestores diferentes, las bacterias acidogénicas de las metanogénicas, generando en cada digestor las condiciones óptimas de crecimiento para cada tipo de bacteria.

### 3.2.1. REACTOR DE FLUJO SUSPENDIDO (UASB).

En este tipo de sistemas, las bacterias se desarrollan como una masa floculante en un flujo ascendente del influente, El lecho bacteriano es retenido por su propia masa y por pequeñas partículas presentes en el influente en la parte inferior del reactor, mientras que el gas y el efluente escapan por la parte superior del mismo. Como la disociación de la biomasa bacteriana ocurre en cierto grado, parte de los organismos se pierden por el efluente. Sin embargo, y aunque el TRH es bajo, el TRS es lo suficientemente prolongado para que se desarrolle una densa masa de microorganismos metanogénicos. En un reactor UASB, la biomasa bacteriana esta presente en forma de granos o glomérulos compactos de hasta 3 - 4 mm, que se desarrollan bajo condiciones de flujo ascendente continuo mediante mecanismos no bien conocidos.

Una de las dos claves principales para mantener un elevado tiempo de retención del fango es la obtención de un fango con buenas características de sedimentación. Auténticos gránulos de tamaño considerables se forman después de uno o dos meses de funcionamiento del sistema. Las características de sedimentación del fango aumentan si el mecanismo de agitación del fango es mínimo o nulo. La concentración de fango en la zona inferior del reactor puede ser de hasta 40 - 70 g SSV/l, y las partículas llegan a alcanzar una velocidad de sedimentación de hasta 50 m/h. Sobre este lecho de fango se desarrolla otro lecho. Este último está formado por gránulos más pequeños, flocules y burbujas de gas y se encuentra estratificado, siendo más denso y con granos más grandes en su zona inferior y menos denso y con gránulos más pequeños en su zona superior.

La segunda clave para el óptimo funcionamiento de este tipo de sistema es la instalación de un separador sólido/gas en la parte superior del reactor. Este Sedimentador / desgasificador actúa como un sedimentador interno, y evita la fuga de los flocules de pequeño tamaño que ascienden adheridos a las burbujas de gas.

### **3.2.2. LAS CARACTERÍSTICAS OPERACIONALES DE ESTE PROCESO SON:**

- ◆ Densidad de carga orgánica (Kg. DQO/m<sup>3</sup>/d): 5-30.
- ◆ Tiempo de retención hidráulico (d): 0,2 - 2.
- ◆ Concentración media en el interior (g SSV/l): 20 - 40.
- ◆ Concentración en el efluente (g SS/l): 0-5.
- ◆ Tiempo de arranque (d): 30 - 60.
- ◆ Velocidad vertical ascendente (m/h): 0,6 - 0,9.

La elevadas cargas orgánicas que admite este tipo de reactores hace que se hayan empleado de manera efectiva en el tratamiento de aguas residuales procedentes de la industria alimentaria.

### **3.3. MICROBIOLOGÍA DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA. VENTAJAS E INCONVENIENTES FRENTE A PROCESOS AEROBIOS.**

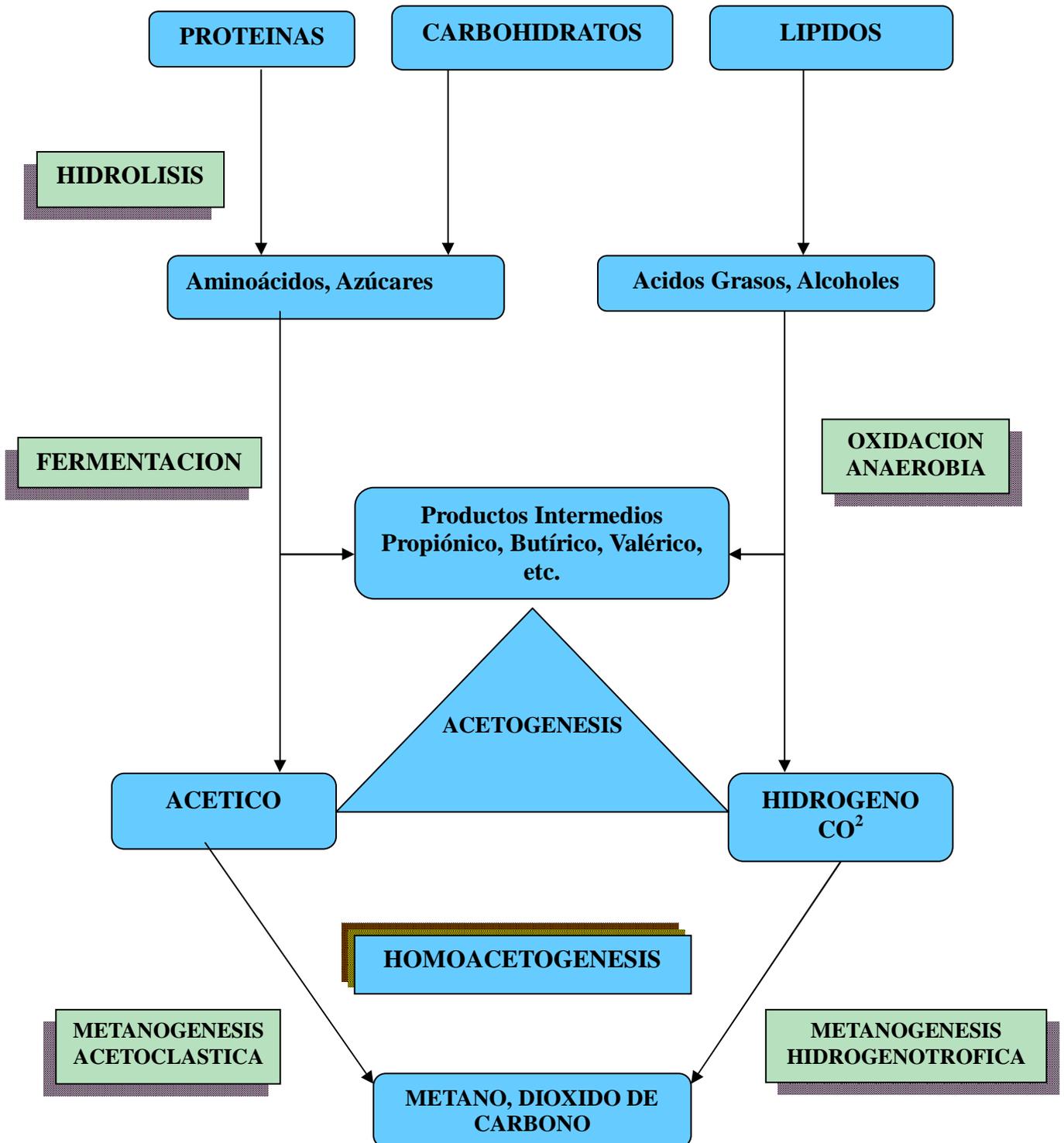
La digestión anaerobia es un proceso biológico gracias al cual se consigue transformar materia orgánica contaminante en biomasa y un gas acompañante, denominado "biogás", cuyos componentes mayoritarios son el metano (CH<sub>4</sub>) y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Así, la digestión anaerobia es un complejo proceso de fermentación microbiana, llevada a cabo por diferentes especies de bacterias las cuales trabajan en condiciones anóxicas.

Este proceso anaeróbico forma parte del tratamiento secundario de las aguas residuales. Siendo especialmente utilizados para la depuración de los residuos ganaderos y los lodos de depuradoras de aguas residuales.

A parte de los principales productos anteriormente descritos (biogás), también se produce una suspensión acuosa donde se concentran todos aquellos materiales de difícil degradación, casi la totalidad del nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>) y del fósforo (P), junto con todos los posibles materiales minerales que formaran parte de la materia orgánica inicialmente.

En resumen podemos decir que la digestión anaerobia es un proceso bioquímico que consta de tres etapas, la hidrolítica, la acetogénica y la etapa metanogénica; en las cuales operan una gran cantidad de bacterias que deben trabajar en un perfecto equilibrio ya que lo producido por unas sirve de alimentos para las siguientes, formando así una cadena que da lugar en el último instante a los productos finales del proceso.

### MATERIA ORGANICA COMPLETA.



Los microorganismos causantes de la descomposición de la materia se dividen en dos grupos:

- ◆ **Bacterias formadoras de ácidos**, estas hidrolizan y fermentan compuestos orgánicos complejos a ácidos simples, de los cuales los más corrientes son el ácido acético y el ácido propiónico.
- ◆ **Bacterias formadoras de metano**, estas convierten los ácidos formados por las bacterias del primer grupo en gas Metano y CO<sub>2</sub>.

Las bacterias más importantes de este grupo (las que devoran los ácidos Acético y propiónico) tienen tasas de crecimiento muy lentas y por ello su metabolismo se considera una limitante de proceso.

Condiciones Óptimas para el Tratamiento Anaeróbico de las Aguas Residuales
T° óptimas:
Intervalo Mesófilo: 29°C a 39°C
Intervalo Termófilo: 49°C a 57°C
Nutrientes Biológicos:
Nitrógeno
Fósforo
pH : 6.6 a 7.6

Las variables que influyen en la digestión anaerobia son:

- ◆ **La temperatura**, depende del tipo de bacteria que se utilicen nos podemos encontrar con procesos mesofílicos produciéndose la digestión a una temperatura óptima entorno a los 35° C.
- ◆ **La acidez**, determina la cantidad y el porcentaje de metano en el biogás, habiéndose encontrado que el valor óptimo de PH oscila entre 6,6 y 7,6. Son muy sensibles a los cambios de PH las bacterias metadogénicas provocando así que sea esta la etapa limitante de la digestión anaerobia.
- ◆ **Contenido en sólidos**, lo que explica que la biomasa más adecuada sea la de alto contenido en humedad.
- ◆ **Nutrientes** para el crecimiento y la actividad de la bacteria, estas tienen que disponer de carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales.

- ◆ **Tóxicos aparte del oxígeno**, inhiben la digestión concentraciones elevadas de amoníaco, sales minerales y algunas sustancias orgánicas como detergentes y pesticidas.

La fermentación de aguas residuales y residuos, esta cobrando en los últimos años cada vez más importancia. Por un lado solamente se pueden eliminar las altas cargas técnicamente y económicamente con un proceso anaeróbico y por el otro se consigue de la fermentación el biogás una energía renovable, lo que es deseable ecológicamente y potencialmente económico. Por ello el tratamiento anaeróbico se ha impuesto en muchas aplicaciones como son por ejemplo: Cerveceras, industria del papel, lácteas.

El tratamiento anaerobio de las aguas residuales del alimento, de las bebidas y de las industrias farmacéuticas tiene muchas ventajas comparadas a otros métodos de tratamiento:

- ◆ El consumo de energía es muy baja con el tratamiento anaerobio. Por ejemplo no tiene que ser provisto oxígeno, o el mezclarse extenso tiene que ocurrir.
- ◆ La mayoría del material orgánico en el agua inútil se convierte en los biogás, que pueden ser usado con el fin de energía o de la producción del vapor. La energía se puede utilizar en la planta de producción o se puede proveer a la red de la energía.
- ◆ La producción del lodo en el tratamiento anaerobio es muy baja, porque la mayoría del material orgánico se convierte en biogas, no en lodo. Además, el lodo anaerobio se estabiliza y se puede desecar fácilmente por la gravedad. El lodo se puede utilizar para comenzar encima de los reactores anaerobios nuevos, o se puede perder en la tierra. Los gastos de tramitación del lodo son por consiguiente mínimos.
- ◆ El lodo anaerobio puede ser almacenado y ser conservado fácilmente, que simplifica los segundos arranques después de que la producción pare o los períodos con tarifas de cargamento orgánicas reducidas.
- ◆ Los costes de inversión son bajos, porque se aplican las altas tarifas de cargamento del reactor y los tiempos de la retención corta. Además, el diseño y la construcción de un reactor anaerobio es simples, que reduce más lejos los costes.

El tratamiento anaerobio es lo más comúnmente posible aplicado como pre-tratamiento, porque se tratan las aguas inútiles normalmente arriba concentradas. La forma de los efluentes el tratamiento anaerobio todavía contiene un poco de material orgánico, a pesar de las eficacias muy altas del retiro. Además los alimentos se quitan solamente en parte, así que post-treatment sea necesario en muchos casos.

### **3.3.1. FERMENTACIÓN ANAERÓBICA.**

#### **3.3.1.1 PRINCIPIOS DE LA FERMENTACIÓN ANAERÓBICA**

La generación de biogás, mezcla constituida fundamentalmente por metano ( $\text{CH}_4$ ) dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), y pequeñas cantidades de hidrógeno (H), sulfuro de hidrógeno ( $\text{SH}_2$ ) y nitrógeno (N) constituye un proceso vital dentro del ciclo de la materia orgánica en la naturaleza.

Las bacterias metanogénicas en efecto constituyen el último eslabón de la cadena de microorganismos encargados de digerir la materia orgánica y devolver al medio los elementos básicos para reiniciar el ciclo. Se estima que anualmente la actividad microbiológica libera a la atmósfera entre 590 y 880 millones de toneladas de metano.

#### **3.3.1.2. PRERREQUISITOS NECESARIOS PARA INICIAR EL PROCESO.**

La fermentación anaeróbica involucra a un complejo número de microorganismos de distinto tipo los cuales pueden ser divididos en tres grandes grupos principales. La real producción de metano es la última parte del proceso y no ocurre si no han actuado los primeros dos grupos de microorganismos.

Las bacterias productoras del biogás son estrictamente anaeróbicas y por lo tanto sólo podrán sobrevivir en ausencia total de oxígeno atmosférico.

Otra característica que las identifica es la sensibilidad a los cambios ambientales debido a lo cual será necesario un mantenimiento casi constante de los parámetros básicos como la temperatura.

Las dificultades en el manejo de estas delicadas bacterias explican que la investigación sistemática tanto de su morfología como de la bioquímica fisiológica sólo se halla iniciado hace cincuenta años.

Hoy en día gracias a estudios muy recientes podemos conocer mejor el mecanismo y funcionamiento de este complejo sistema microbiológico involucrado en la descomposición de la materia orgánica que la reduce a sus componentes básicos  $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ .

### **3.3.2. ETAPAS DE LA DIGESTION ANAEROBIA.**

Veamos ahora las diferentes etapas intervinientes y sus principales características.

#### **3.3.2.1. ETAPA HIDROLÍTICA.**

Es el paso inicial en todo proceso degradativo de la materia orgánica compleja. Este paso es necesario debido a que la materia orgánica polimérica no es asimilable por los organismos, por lo que se ven obligados a degradarla en componentes mas sencillos, para lo cual hidrolizan estos materiales obteniendo componentes solubles capaces de atravesar la membrana plasmática siendo así asimilado por los microorganismos.

Las bacterias de esta primera etapa toman la materia orgánica virgen con sus largas cadenas de estructuras carbonadas y las van rompiendo y transformando en cadenas más cortas y simples (ácidos orgánicos) liberando hidrógeno y dióxido de carbono.

Este trabajo es llevado a cabo por un complejo de microorganismos de distinto tipo que son en su gran mayoría anaerobios facultativos.

Así en esta etapa, las proteínas son hidrolizadas por Proteasas en proteosas, peptonas, pépticos y aminoácidos. En este paso las proteínas son atacadas principalmente por enzimas extracelulares (proteinasas) excretadas por los microorganismos fermentativos. En estas condiciones anóxicas, los lípidos son degradados por encimas hidrolíticas (lipasas) provocando una ruptura inicial de las grasas, obteniendo ácidos grasos de cadena larga, además de moléculas de glicerol. De esta forma, se obtienen una serie de compuestos solubles, como oligosacáridos azúcares, alcoholes, aminoácidos y ácidos grasos, listos para ser fermentados por microorganismos acidogénicos.

### **3.3.2.2. ETAPA FERMENTATIVA Y ACETOGÉNICA.**

En esta etapa las moléculas orgánicas solubles obtenidas en la hidrólisis son fermentadas, dando lugar a compuestos que pueden utilizar las bacterias metanogénicas (acético, fórmico e hidrógeno), además de otros compuestos orgánicos más reducidos (ácido Láctico, etanol, propiónico, butírico,...) los cuales deben ser oxidados por organismos acetogénicos para conseguir sustratos degradables por los microorganismos metanogénicos.

Esta reacción es endoenergética pues demanda energía para ser realizada y es posible gracias a la estrecha relación simbiótica con las bacterias metanogénicas que substraen los productos finales del medio minimizando la concentración de los mismos en la cercanía de las bacterias acetogénicas. Esta baja concentración de productos finales es la que activa la reacción y actividad de estas bacterias, haciendo posible la degradación manteniendo el equilibrio energético.

Los microorganismos acetogénicos se encargan, principalmente, de la degradación de los ácidos grasos de cadena larga mediante la ruta de la beta-oxidación es un ciclo metabólico, por el cual, en cada giro se libera un acetil-CoA, produciendo ácido acético a su vez. Este proceso se da en el interior de la bacteria, por lo que es necesario, que el ácido graso traspase la membrana plasmática convirtiéndose al mismo tiempo en un tio-ester-CoA, lo que ayuda a que se active su degradación. El proceso consiste en una deshidrogenización del ácido graso liberando hidrogeno molecular a través del intermediario NADH y, siendo el hidrogeno el principal aceptor de electrones en el proceso.

En resumen, la acetogénesis es la etapa donde los alcoholes, ácido graso y compuestos aromáticos se degradan produciendo ácido acético, CO<sub>2</sub> e hidrogeno, sustratos aprovechables por las bacterias metanogénicas.

### 3.3.2.3. ETAPA METANOGENICA

En esta etapa final los microorganismos anaerobios metanogénicos se encargan de transformar en metano los productos orgánicos obtenidos en las etapas anteriores, eliminando así estos del medio.

Las bacterias intervinientes en esta etapa pertenecen al grupo de las achibacterias y poseen características únicas que las diferencian de todo el resto de las bacterias, por lo cual, se cree que pertenecen a uno de los géneros más primitivos de vida colonizadoras de la superficie terrestre.

Estas bacterias metanogénicas obtienen el metano a partir de sustrato como el acetato, hidrogeno molecular, dióxido de carbono, metanol y algunos metilaminas. Esta fase es estrictamente anaerobia ya que es llevada a cabo por determinadas arqueas metanogénicas, las cuales son anaerobias estrictas. Estas solo obtienen energía mediante la generación de metano, lo que provoca que este proceso solo se pueda realizar en condiciones anóxicas.

Se distinguen dos grandes grupos de microorganismos según el sustrato que degradan principalmente, que son los hidrogenotróficos, que degradan hidrogeno y fórmico y los acetoclásticos o metilotróficos, consumidores de grupos metilos del acetato, metanol y algunas aminas.

De los organismos capaces de realizar este proceso, la mayoría emplearan el hidrogeno molecular como aceptador de electrones, aunque hay que destacar la peculiaridad de los dos únicos géneros capaces de utilizar el acetato. Estos últimos tienen una mayor importancia al saber que, alrededor de un 70% del CH<sub>4</sub> producido en los reactores anaeróbicos es obtenido a partir del acetato. Esta metanogénesis acetotrofica solo es realizada por los géneros Methanosarcina y Methanotherix.

#### *Reacciones hidrogenotróficas.*



#### *Reacciones acetoclásticas.*

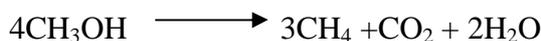


#### Reacciones de metanogénesis a partir de otros sustratos.

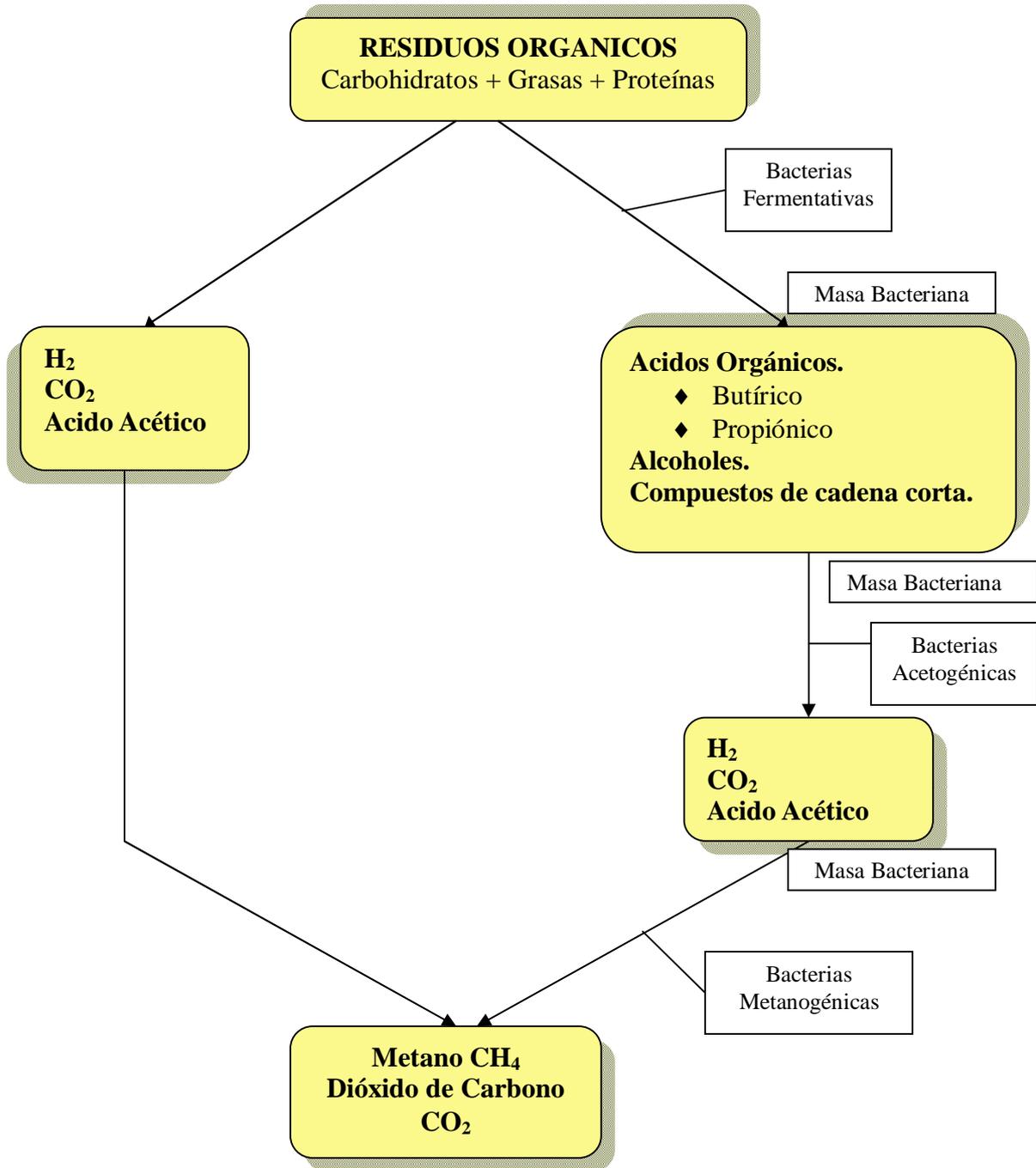
##### Fórmico



##### Metanol



El siguiente gráfico resume las distintas características de cada una de las etapas vistas que por simplificación se han agrupado en dos fases (ácida que involucra la de hidrólisis y acidificación y la metanogénica), con los principales compuestos químicos intervinientes.



Los microorganismos intervinientes en cada fase tienen propiedades distintas que son muy importantes y se las debe conocer para lograr comprender el equilibrio y funcionamiento óptimo de un digestor.

Estas características han sido resumidas en el cuadro para su mejor comprensión.

Fase Acidogénica	Fase Metanogénica
Bacterias facultativas (pueden vivir en presencia de bajos contenidos de oxígeno).	Bacterias anaeróbicas estrictas (No pueden vivir en presencia de oxígeno).
Reproducción muy rápida (alta tasa reproductiva).	Reproducción lenta (baja tasa reproductiva).
Poco sensibles a los cambios de acidez y temperatura.	Muy sensibles a los cambios de acidez y temperatura.
Principales metabolitos, ácidos orgánicos.	Principales productos finales, metano y dióxido de carbono

### 3.4. CINÉTICA DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA.

#### 3.4.1. EL PASO LIMITANTE

Se considera que el paso o proceso limitante durante la digestión anaeróbica de un efluente orgánico que contiene una considerable cantidad de material particulado (agua residual de una planta de concentrados) es la hidrólisis, proceso por el cual sustancias poliméricas no disueltas son convertidas en monómeros o dímeros disueltos. La hidrólisis depende de la temperatura del proceso, el tiempo de retención hidráulica, la composición del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), el tamaño de partículas, el pH, la concentración de  $\text{NH}_4^+$  y la concentración de los productos de la hidrólisis (ácidos grasos volátiles). La hidrólisis puede ser descrita por una cinética de primer orden.

$$V_s \frac{dF}{dt} = Q (F_0 - F) - K_h \cdot F$$

Donde:

$F$  = concentración de sustrato degradable no disuelto ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$t$  = tiempo, medido en  $d$  = días

$K_h$  = constante de hidrólisis ( $d^{-1}$ )

$V_s$  = volumen de reactor ( $\text{m}^3$ )

$Q$  = caudal de líquido influente ( $\text{m}^3/\text{d}$ ).

La hidrólisis se efectúa a través de exoenzimas excretadas por bacterias fermentativas.

### 3.4.2. CRECIMIENTO, MUERTE, RENDIMIENTO Y ACTIVIDAD

Cuando existe suficiente sustrato y nutrientes, la tasa neta de crecimiento de microorganismos puede ser descrita por una simple ecuación autocatalítica corregida por un factor que representa la tasa de muerte de microorganismos, siguiendo una cinética de primer orden:

$$r_x = \frac{dx}{dt} = (\mu - K_d) \cdot X$$

Donde:

$r_x$  = velocidad de crecimiento de microorganismos (kg/m<sup>3</sup>.d)

$X$  = concentración de microorganismos (kg/m<sup>3</sup>)

$\mu$  = tasa específica de crecimiento de los microorganismos (d<sup>-1</sup>)

$t$  = tiempo (d)

$K_d$  = tasa de muerte celular (d<sup>-1</sup>)

El coeficiente de rendimiento  $Y$  es la biomasa (microorganismos)

$X$ , que se produce por unidad de sustrato  $S$ , y puede ser expresada como kg microorganismos/kg sustrato.

$$Y = \frac{r_x}{r_s}$$

Donde:

$r_s = dS/dt$  es la tasa de consumo de sustrato. También puede decirse que

$$r_s = \frac{(\mu X)}{Y}$$

Donde:

El cociente entre  $\mu$  e  $Y$  es la actividad específica de los microorganismos, expresada como kgDQO / kgSSV.

DQO = Demanda Química de Oxígeno

SSV = Sólidos Suspendidos Volátiles.

### 3.3.2.3 EL MODELO CINÉTICO DE MONOD

Monod propuso que la tasa de crecimiento depende no sólo de la concentración de microorganismos, sino también de la concentración de sustrato. Describió esta relación con una función hiperbólica similar a la propuesta por Michaelis-Menten para la interacción enzima-sustrato:

$$\mu = \mu_{\text{máx.}} \frac{S}{K_s + S}$$

$\mu_{\text{máx}}$  = tasa máxima de crecimiento de microorganismos ( $\text{d}^{-1}$ );

$S$  = concentración de sustrato ( $\text{kgDQO}/\text{m}^3$ )

$K_s$  = constante de Monod, también llamada constante de saturación media ( $\text{kgDQO}/\text{m}^3$ )

Se acepta actualmente que la conversión de sustratos solubles durante la digestión anaeróbica se rige por la ecuación de Monod.

### **3.5. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA.**

#### **3.5.1. VENTAJAS**

Muchas veces se debe emplear la digestión anaerobia para deshacerse de excesos de biomasa cuando están presentes compuestos recalcitrantes, caso en el cual la digestión aerobia es incapaz de degradar.

Se consigue por tanto un buen tratamiento en el residuo, contaminantes que ayuda a eliminar posibles malos olores y microorganismos patógenos, además con la degradación parcial de la materia orgánica, se mejora la calidad del agua residual que se vierte a los ríos o se infiltra en el terreno.

Como producto final se obtiene esa mezcla de metano y  $\text{CO}_2$  que en conjunto forman lo que conocemos como biogás. Este se puede emplear como un combustible muy energético.

En los reactores anaerobios se obtienen resultados que certifican la validez del proceso:

- La eliminación de compuestos contaminantes es similar a la de los reactivos aerobios.
- Se consigue reducir la DBO en un 80%.
- Se consigue reducir la DQO en un 50%.
- Los lodos que se obtienen tienen menor volumen y se puede secar con más facilidad que los obtenidos en la digestión aeróbica.

#### **3.5.2. INCONVENIENTES.**

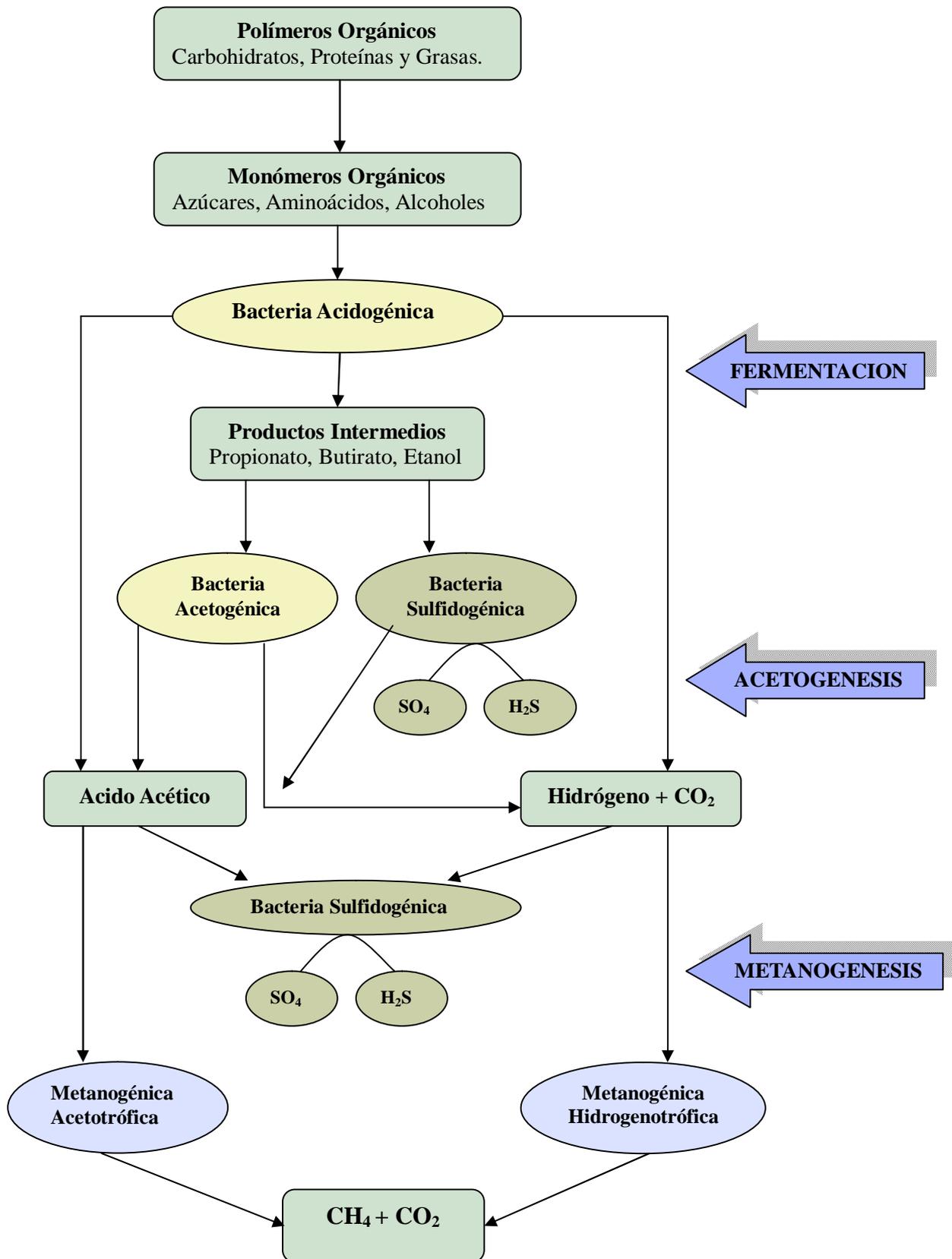
La digestión anaerobia está más limitada que la aerobia, ya que el factor limitante en la aerobia es el oxígeno, bastante abundante en la atmósfera, mientras que para mantener las condiciones anóxicas se deben controlar magnitudes como el PH, acidez, además de evitar la presencia de oxígeno.

Las bacterias metanogénicas son inhibidas por multitud de compuestos, convirtiéndose en la principal fuente de problemas del funcionamiento de los reactores anaerobios.

En el proceso solo pueden trabajar unas determinadas bacterias, convirtiéndose en procesos exclusivos (caso de la metanogénesis). Sin embargo, en la digestión aerobia se pueden utilizar una gran variedad de bacterias.

La digestión anaerobia tiene menor eficacia, debido a que su rendimiento ecológico es menor, consiguiendo convertir menor cantidad de materia orgánica en biomasa. Esto se debe a que al obtener metano como producto final, este acumula mucha energía y por ello la energía final obtenida es menor.

## Flujo de Carbono Mediante la Degradación Anaerobia de la Materia Orgánica.



## CAPITULO IV

### CONSTRUCCIÓN DE UN REACTOR ANAEROBIO PILOTO CONTINUO.

#### 4.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.

En el diseño y operación del reactor deben ser considerados los factores que condicionan la obtención de un lodo con las características requeridas para el acoplamiento con la fase siguiente del tratamiento y que reúna las condiciones permitidas para su disposición final y de un agua recuperada que pueda ser reincorporada al proceso de potabilización.

#### 4.2 MODELO MATEMATICO DEL SISTEMA.

El modelo matemático del sistema, parte de las ecuaciones del balance de materia de tres variables de estado:

- ◆ Biomasa: expresada como concentración de sólidos suspendidos volátiles(SSVV)
- ◆ Substrato: expresado como demanda química de oxígeno(DQO)
- ◆ Ácidos grasos volátiles(AGV)

Las ecuaciones dinámicas son las siguientes:

$$\frac{dx}{dt} = D(X_o - X_e) + (X, S) - kd^* X \quad (1)$$
$$\frac{dS}{dt} = D(S_o - S) + kd^* r(X, S) \quad (2)$$
$$\frac{dAGV}{dt} = D(AGV_o - AGV) + k2^* r(X, S) \quad (3)$$

Donde:

D: velocidad de dilución, razón entre el flujo de entrada y el volumen del reactor ( $h^{-1}$ ).

X: concentración de SSV en el reactor (mg /l)

X<sub>o</sub>: concentración de SSV a la entrada del reactor (mg /l)

X<sub>e</sub>: concentración de SSV del efluente del reactor (mg /l)

S: concentración de DQO en el reactor (mg /l)

S<sub>o</sub>: concentración de DQO a la entrada del reactor (mg /l ácido acético)

AVG: concentración de AGV en el reactor (mg /l ácido acético).

AVG<sub>0</sub>: concentración de AGV a la entrada del reactor (mg /l ácido acético).

R(X,S): velocidad de reacción por crecimiento microbiano (mg /(l\*h)).

kd: coeficiente de decaimiento (h<sup>-1</sup>).

Los parámetros de k<sub>1</sub> y k<sub>2</sub> corresponden a coeficientes de rendimiento y producción celular por conversión biológica y bioquímica del sustrato y los ácidos grasos volátiles, respectivamente.

La velocidad de reacción por crecimiento celular, se plantea en relación a una cinética de Monod, propuesta por este entre 1942 y 1949 (**Mussati et al**), de la siguiente forma:

$$R(X,S) = \mu_{\max} \frac{S}{K + S} X \quad (4)$$

**Donde:**

**μ<sub>max</sub>**: Velocidad de crecimiento máxima (h<sup>-1</sup>)

**K**: constante de Monod (mg / l)

Los parámetros cinéticos del sistema fueron obtenidos en un trabajo previo (**Muñoz et al, 2005**)

Para la obtención de coeficiente k<sub>2</sub>, relacionado con los ácidos grasos volátiles, se consideró la dependencia de la concentración de AGV con la biomasa a nivel global, es decir sin realizar distinción entre la bacteria acidogénica y metanogénicas. En un trabajo futuro se realizará un estudio más preciso de dicho parámetro.

#### **4.2.1 OBSERVADOR DEL ESTADO BASADO EN INTERVALOS**

Como se dijo anteriormente el modelado de procesos biológicos es una tarea compleja, que trae consigo grados de incertidumbre en relación al sistema real; siendo necesario contar con otras alternativas para conocer las variables de estado del sistema. En ciertos casos, cuando se tiene ciertos grados de seguridad sobre la cinética que sigue el proceso (Monod, inhibición), es posible aplicar técnicas de identificación de los parámetros cinéticos (**Muller et al, 2002**), o se puede realizar una estimación de estado sin necesidad de determinar estos parámetros (**Hilgert et al, 2000**).

Una de las técnicas de estimación más empleadas corresponde a los observadores de estados, que pretenden estimar los estados del sistema a partir del conocimiento de las entradas y salidas del mismo. Cuando el sistema de ecuaciones de estado solo se

desconoce las condiciones iniciales, el observador de Luenberger y el filtro de Kalman extendido, pueden ser utilizados para la estimación.

Sin embargo, además de la incertidumbre por condiciones iniciales, los procesos biológicos presentan un alto grado de incertidumbre en relación a las cinéticas involucradas en ellos y a las variables de entrada, debido a las dificultades de medición.

Los observadores clásicos lineales o no lineales, pueden realizar estimaciones de las variables no medidas, a pesar de las incertidumbres referidas a las condiciones iniciales y a la cinética del proceso, sin embargo requieren del conocimiento, referidos como observadores de cinética desconocida, referidos como observadores asintóticos, en donde se conocen los coeficientes de rendimiento y la velocidad de dilución, también pueden realizar la estimación de estados conociendo las variables de entrada (**Alcaraz et al, 2002**).

En el sistema descrito por las ecuaciones (1) - (3), se puede realizar un cambio de variables de la siguiente forma:

$$Z = AGV \quad (5)$$

$$Z1 = \frac{-Z}{K2} + X \quad (6)$$

$$Z2 = \frac{-k1*Z}{K2} + X \quad (7)$$

La medición de la concentración de biomasa y de substrato se lleva a cabo a través de métodos físicos (secado) y químicos (reflujo, titulación), es decir fuera de línea, mientras que la concentración de ácidos grasos volátiles, puede ser medida a través de sensores conectados en líneas (**Meter et al, 2003**).

Para el estudio se considera entonces que es posible medir la concentración de AGV y la velocidad de dilución (D) para realizar la estimación de la concentración de biomasa y de substrato en el reactor.

Realizando las sustituciones adecuadas se tiene:

$$\frac{dZ1}{dt} = D*(-(AGV_o/k2) + X_o - X_e) + ((D - kd)/k2)*Z - kd*Z1 \quad (8)$$

$$\frac{dZ2}{dt} = D*(Z2_o - Z2) \quad (9)$$

Las ecuaciones (8) y (9) corresponden a un sistema lineal y no involucran la expresión cinética de crecimiento celular, facilitando de esta manera su resolución. Para resolver el sistema se deben definir: el valor del coeficiente de decaimiento, las constantes de rendimiento, las condiciones iniciales de las variables de estado y las concentraciones  $S_o$ ,  $AGV_o$ ,  $X_o$  y  $X_e$ . Los valores de  $X_o$  y  $X_e$  se toman de acuerdo al trabajo previo realizado como valores constantes (1200 y 775 mg/l respectivamente), puesto que en realidad no presenta una influencia marcada en el modelo, debido a que el lixiviado a la entrada del reactor no contiene una cantidad considerable de biomasa, lo que también es aplicable a la corriente de salida, a causa de la retención celular propia de la configuración del UASB. La concentración de  $AGV_o$  se mantendrá en un valor de 129.46 (mg/l ácido acético), valor que puede ser alimentado al estimador, dado que es un parámetro medible. La velocidad de dilución, también puede ser medida, a través de un medidor de flujo. De lo anterior se concluye que la incertidumbre respecto a las entradas del sistema se relaciona con la concentración de sustrato en la corriente influyente de lixiviado, la cual depende de diversos factores, tales como:

- ◆ Clima
- ◆ Condiciones meteorológicas del lugar.
- ◆ Geología y morfología del sitio
- ◆ Hidrología del sitio.
- ◆ Material de cobertura del relleno.
- ◆ Capa vegetativa.
- ◆ Condiciones operacionales del relleno
- ◆ Naturaleza de la basura
- ◆ Edad del relleno y grado de descomposición de la basura
- ◆ Costumbres de los usuarios

Dada la incertidumbre de las condiciones de entrada, y las condiciones iniciales, se pueden establecer límites inferiores y superiores de las condiciones anteriores, y de esa manera construir un observador por intervalos, que garantice la determinación de los límites sobre los cuales se encuentran las variables de estado.

Con el objeto de establecer la variabilidad de la concentración de DQO a la entrada del reactor, se han desarrollado modelos cinéticos que intentan explicar el proceso de degradación que ocurre en el relleno sanitario. En este caso se tendrá en cuenta un modelo desarrollado en un estudio de predicción de la calidad lixiviado del relleno Sanitario Curva.

El modelo fue obtenido por el desarrollo de experimentos en Lixímetros de laboratorios, y es el siguiente:

$$\frac{dS_o}{dt} = \frac{K_1 * M_{so} * e^{-x_1^2}}{V} - K_2 * (S_o - \lambda * S_o) - \frac{Q * S_o}{V} \quad (10)$$

Donde:

$S_o$ : concentración de materia orgánica en el lixiviado, expresada como DQO.

$K_1$ : constante cinética de decaimiento de la materia orgánica en fase sólida ( $0.0030h^{-1}$ ).

$K_2$ : constante cinética de la descomposición biológica de la materia orgánica biodegradable en la fase líquida ( $5.833e^{-4}$ ).

$M_{so}$ : Masa inicial de DQO del lixiviado en la fase sólida (2564000mg)

$\lambda$ : representa el porcentaje de masa no biodegradable presente en la masa total lixiviable (0.02)

$Q$ : caudal (0.033 l/h)

$V$ : volumen del Lixímetro (106.03 l)

$T$ : tiempo (h)

Del modelo anterior se representara la entrada de sustrato al sistema, sin embargo como la determinación de la DQO no es fácilmente medible en línea, se establecerán los posibles límites de variación:

$$\begin{aligned} S_{o(1)}^+ &= S_o(1) + 1000 \\ S_{o(1)}^- &= S_o(1) - 1000 \end{aligned} \quad (11)$$

La expresión anterior es entonces un estimador de la variación de la concentración de sustrato a la entrada del reactor.

El sistema de ecuación (8) y (9) se transforma al introducir la posible variación en el tiempo de la entrada del sistema de la siguiente manera:

Para el límite superior:

$$\frac{dZ1^+}{dt} = D * (-(AGVo/k2) + X_o - X_e) + ((D - kd)/k2) * Z - kd * Z1^+ \quad (12)$$

$$\frac{dZ2^+}{dt} = D * (Z2o^+ - Z2^+)$$

Para límites inferiores:

$$\frac{dZ1^-}{dt} = D * (-(AGVo/k2) + X_o - X_e) + ((D - kd)/k2) * Z - kd * Z1^- \quad (13)$$

$$\frac{dZ2^-}{dt} = D * (Z2o^- - Z2^-)$$

Al solucionar el sistema anterior se obtienen los límites de las variables de estado:

Para el límite superior:

$$\hat{X}^+ = Z1^+ + \frac{Z}{k2} \quad (14)$$

$$\hat{S}^+ = Z2^+ + \frac{k1*Z}{k2}$$

Para límite inferior:

$$\hat{X}^- = Z1^- + \frac{Z}{k2} \quad (15)$$

$$\hat{S}^- = Z2^- + \frac{k1*Z}{k2}$$

### **4.3. CRITERIOS DE DISEÑO EMPLEADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR PILOTO.**

- ◆ Materiales de Construcción.
- ◆ Temperatura.
- ◆ Acidez.
- ◆ Volumen del Reactor.
- ◆ Tiempo necesario para el crecimiento bacteriano adecuado.
- ◆ Carga orgánica que será tratada en el reactor.
- ◆ Velocidad Ascensional
- ◆ Tiempo de retención.

### **4.4. VOLUMEN DEL REACTOR.**

El equipo ha sido diseñado para manejar un volumen de 0.0299 m<sup>3</sup> aproximadamente. Para trabajar en forma continúa.

#### 4.4.1. TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRAULICA.

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

$$TRH = \frac{29900 \text{ ml}}{0.17 \text{ ml/seg}}$$

$$\underline{TRH = 175882, 352\text{seg}}$$

$$\underline{TRH = 2.04 \text{ Días}}$$

#### 4.4.2 VELOCIDAD ASECIONAL.

$$V = Q/A \quad A = \pi r^2 \quad \longrightarrow \quad A = 0.0491 \text{ m}^2$$

$$V = \frac{0.17 \text{ ml/seg}}{0.0491 \text{ m}^2} \quad \longrightarrow \quad V = \frac{6.12 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{H}}{0.0491 \text{ m}^2}$$

$$V = 0.0125 \text{ m/H}$$

#### 4.4.3 CARGA VOLUMETRICA.

$$CV = \frac{Q * DQO}{V}$$

$$CV = \frac{DQO_E}{TRH}$$

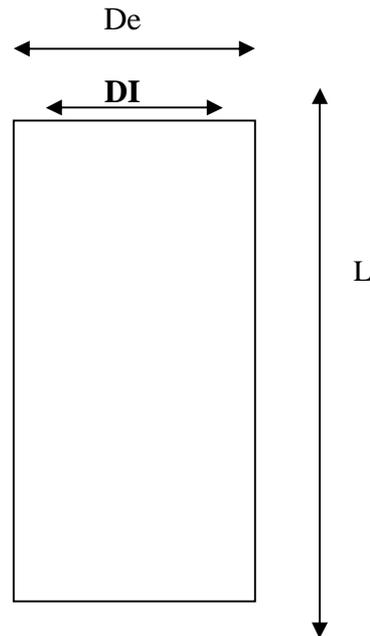
DQO <sub>E</sub>	
01/02/2007	2664.05 ml/lt

$$CV = \frac{2664.05 \text{ ml/lt}}{2.04 \text{ día}}$$

$$CV = 1305, 91 \frac{\text{ml/lt}}{\text{día}}$$

#### 4.5 DIMENSIONES DEL REACTOR.

Diámetro externo = 25 cm.  
Diámetro interno = 24.2 cm.  
Longitud = 75 cm.



#### 4.6 Material del Reactor.

En la construcción del reactor fue escogido

El acrílico; ya que posee muchas ventajas:

- ◆ No sufre corrosión alguna.
- ◆ Fácil visualización.
- ◆ Químicamente inerte.

#### 4.7 RELLENO.

El material que se utilizó como relleno, fue un anillo plástico; debido a las ventajas que este presenta, tales como: (se le colocó una malla, con el fin de mantener los anillos en la parte inferior del reactor).

- ◆ Las bacterias se adhieren con mucha facilidad a este material.
- ◆ Mantiene el lodo en sus paredes.
- ◆ El relleno permite una mejor distribución del líquido.

#### 4.8 DESCRIPCION DEL EQUIPO Y FUNCIONAMIENTO DE LOS ACCESORIOS.

##### 4.8.1 REACTOR.

El reactor consta de un cuerpo cilíndrico, un recolector de gas, accesorios y tuberías.

##### 4.8.2 RECOLECTOR DE GAS.

Es un punto en el techo del digester desde el cual se recolecta el gas del tanque; a su vez cumple otro papel, el de no dejar que los lodos salgan.

### 4.8.3 ACCESORIOS.

Entre los accesorios empleados en el reactor piloto, tenemos los siguientes:

### 4.8.4 TUBERÍAS.

No se debe cerrar nunca las válvulas de cada extremo durante algunos días, ya que la producción de gas puede elevar la presión lo suficiente como para provocar un colapso en el equipo. Además, los sólidos formarán una masa casi inamovible en la tubería.

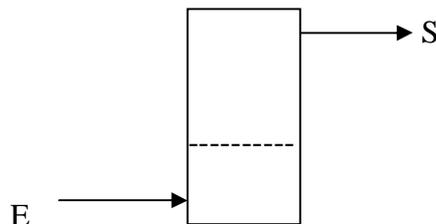
### 4.9 OPERACIÓN DEL REACTOR

Estando el reactor listo, Como es la inoculación y graduando el flujo de la bomba, ya que si el flujo es demasiado alto puede expulsar los lodos o puede tener un tiempo de retención muy pequeño y no puede ser muy eficiente después de experimentar se le dejo el flujo a 0.17 ml/seg. Con un tiempo de retención hidráulico de 2.036 día. Al analizar el DQO vimos que se podía remover asta un 72 % aproximadamente.

### 4.10 PROGRAMA DE MUESTREO

El procedimiento de la toma de la muestra, y los análisis de DQO, Alcalinidad.

EL objeto del programa de muestreo es caracterizar todas las concentraciones y caudales indicados en la siguiente figura.



Punto de Muestreo	Técnica de muestreo
Entrada	Tomar directamente de la entrada, donde la bomba se alimenta
Salida	De la salida del reactor se toma la muestra, haciendo drenar el envase varias veces su propio volumen

El programa de muestreo aplicado durante el marco del proyecto.

Los números indica la frecuencia con que debe ser tomada las muestras, diaria

	<b>E</b>	<b>Reactor</b>	<b>S</b>
<b>pH</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>
<b>Alcalinidad</b>	<b>1</b>	–	–
<b>DQO</b>	<b>1</b>	–	<b>3</b>

- ◆ El pH es medido con un equipo portátil de la empresa HACH.
- ◆ El rendimiento en la remoción de la contaminación orgánica durante las distintas fases del tratamiento biológico se expresa como eliminación de DBO, La DQO<sub>total</sub> es determinada por digestión con dicromato y colorimetría mediante un espectrofotómetro HACH.
- ◆ Los sólidos totales en suspensión (SST, MLSS) se obtienen secando a 105°C, cuya fracción de pérdida por ignición a 550°C representa los sólidos volátiles en suspensión (SSV, MLVSS), comúnmente calificado como biomasa.

## **CAPITULO V**

### **PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL REACTOR ANAERÓBICO UASB**

#### **5.1. IDENTIFICACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES A UTILIZAR EN EL REACTOR**

El agua residual que se uso en el reactor fue agua proveniente de una planta de concentrado de Maracuyá.

La muestra para el equipo se la tomo de la salida del proceso, El DQO de este varia constantemente, esto se puede deber a que el agua viene con mucha o poca cantidad de materia orgánica.

##### **5.1.1. TEMPERATURA**

La temperatura óptima de crecimiento para las bacterias esta entre 30 y 40 °C, Aquí en esta planta se trabaja con ese rango de temperatura. El Agua residual con la que se trabajó poseía una temperatura ambiente.

##### **5.1.2. NUTRIENTES**

Para que los microorganismos se puedan desarrollar con muchas facilidades el medio nutriente debe estar compuesto básicamente de Nitrógeno y Fósforo ya que son esenciales para el crecimiento bacteriano, En esta agua residual la cantidad de nitrógeno es muy poca razón por la cual se le agrega nitrógeno a la entrada en forma de urea.

##### **5.1.3. OXIGENO DISUELTO**

Para este caso como tenemos un equipo anaerobio, y para que las bacteria se puedan desarrollar con mucha facilidad y así evitar su muerte, el agua residual con la que se va a trabajar es preferible tener 0 ml / l de oxigeno disuelto pero es difícil que el agua salga a estas condiciones ya que siempre se encuentra oxigeno disuelto ya sea en pequeñas cantidades.

##### **5.1.4 pH**

El pH adecuado para que las bacterias se desarrollen con mucha facilidad debe de oscilar entre 7 a 8, pero el agua residual con la que se trabajo tenía un pH de 3.5 a 4.5, se le agregaba cal para que el pH este entre 10 a 11, ya que con la digestión anaeróbica producida en el reactor hacia bajar el pH, y a la salida este se encontraba entre 6 y 7.

## 5.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES. (Flujo= 0.25 ml/sg.)

Hora	Fecha	Tanque	Reactor Piloto			
		ph <sub>e</sub>	ph <sub>sv-4</sub>	ph <sub>sv-5</sub>	ph <sub>sv-6</sub>	ph <sub>s</sub>
9:00	17/10/2006	11.65	6.32	6.37	6.46	<b>6.47</b>
11:30		11.41	6.17	6.41	6.38	<b>6.70</b>
9:00	18/10/2006	11.52	6.57	6.58	6.57	<b>6.63</b>
9:30	20/10/2006	11.63	7.05	7.05	7.02	<b>7.01</b>
11:00		11.52	6.89	6.93	6.98	<b>6.97</b>
<b>9:40</b>	<b>23/10/2006</b>	<b>10.37</b>	<b>6.74</b>	<b>6.73</b>	<b>6.72</b>	<b>6.78</b>

A través de estos datos, observamos claramente que el reactor piloto, se encontraba perfectamente estabilizado; por tal razón se dio comienzo con las pruebas de Demanda Química de Oxígeno. Las cuales observamos en la siguiente tabla:

Hora	Fecha	ph <sub>e</sub>	ph <sub>s</sub>	DQO				Alcalinidad (ppm).
				Abs <sub>e</sub>	Abs <sub>s1</sub>	Abs <sub>s2</sub>	Abs <sub>s3</sub>	
9:00	24/10/2006	10.4	7.67	0.199				Primer día de muestreo no se determinaba (pruebas iniciales).
10:00					0.098			
11:00						0.331		
12:00							0.143	
9:00	25/10/2006	11.4	7.82	0.188				Segundo día tampoco se determinó.
10:00					0.224			
11:00						0.170		
12:00							0.156	

Mediante la obtención de los datos anteriormente mostrados en la tabla; se puede observar el óptimo funcionamiento del reactor piloto.

		<b>Tanque</b>	<b>Reactor Piloto</b>
<b>Hora.</b>	<b>Fecha.</b>	<b>ph<sub>e</sub></b>	<b>ph<sub>s</sub></b>
<b>9:00</b>	<b>30/10/2006</b>	11.15	<b>9.11</b>
10:00		11.02	<b>9.13</b>
11:00		11.05	<b>9.02</b>
12:00		10.91	<b>8.73</b>
13:00		10.89	<b>8.90</b>
14:00		10.83	<b>8.84</b>

**El 31/10/2006:** Se procedió a retirar el agua en su totalidad del reactor, y colocamos más cantidad de lodo, el cual dejamos durante un período de 5 días, para su respectiva inoculación.

Por medio de estos resultados obtenidos de medición del ph, se observa que nuevamente se consiguió la estabilización del reactor; por lo cual se retomó al análisis de los parámetros siguientes: DQO y Alcalinidad.

		<b>Tanque</b>	<b>Reactor piloto</b>
<b>Hora</b>	<b>Fecha</b>	<b>ph<sub>e</sub></b>	<b>ph<sub>s</sub></b>
<b>9:30</b>	<b>07/11/2006</b>	11.01	<b>6.29</b>
10:30		10.93	<b>6.01</b>
11:30		10.93	<b>6.08</b>
12:30		10.95	<b>6.08</b>
13:30		10.95	<b>6.11</b>
<b>9:30</b>	<b>08/11/2006</b>	11.18	<b>6.56</b>
10:30		11.13	<b>6.59</b>
11:30		11.12	<b>6.58</b>
12:30		11.13	<b>6.64</b>
<b>13:30</b>		<b>11.13</b>	<b>6.67</b>

### 5.3. Pruebas Experimentales. (Flujo= 0.17 ml/sg).

Hora	Fecha	phe	phs	Abse	Abs1	Abs2	Abs3	Alcalinidad(ppm)
9:00	09/11/2006	11.31	7.34	0.027		No eran necesarias, iniciamos nuevamente.		No se determina hasta obtener mejores resultados.
10:00				0.286				
10:00	10/11/2006	10.88	7.79	0.253	0.297			<b>No se determinó</b>
11:00						0.304		
9:00	20/11/2006	8.81	11.41	0.325			El agua del reactor piloto, estaba muy alcalina, los datos obtenidos eran malos.	
9:35					0.312			
10:40						0.320		
9:00	21/11/2006	8.41	10.21	0.252		Continuaba el problema con el agua y las bacterias en el reactor piloto.		
10:00					0.271			
9:00	22/11/2006	9.4	7.21	0.182				76
10:00					0.269			
11:00						0.297		
9:00	23/11/2006	11.30	6.75	0.160	0.189			120
10:00						0.236		
9:00	24/11/2006	9.74	6.84	0.225	0.192			<b>No se pudo determinar.</b>
10:00						0.288		
9:00	27/11/2006	9.66	6.94	0.350				66
10:00					0.366			
11:00						0.372		
9:00	29/11/2006	10.71	6.91	0.356				196
10:00					0.318			
9:00	30/11/2006	11.14	6.91	0.349				150
10:00					0.335			
9:00	01/12/2006	11.14	6.61	0.343				150
10:00					0.331			
9:00	02/12/2006	9.81	6.85	0.311				78
10:00					0.300			
9:00	06/12/2006	10.29	6.95	0.188	0.187			76
9:00	07/12/2006	10.82	6.98	No se realizó DQO.				256
9:00	12/12/2006	10	6.98	No se realizó DQO.				308

**En estas pruebas se alimento con carbonato de Na, las anteriores fueron con cal.**

Hora	Fecha	ph <sub>e</sub>	ph <sub>s</sub>	Abs <sub>e</sub>	Abs <sub>1</sub>	Alcalinidad(ppm)	
9:00	13/12/2006	10	6.99	0.311		No se puede determinar.	
10:00					0.347		
9:00	14/12/2006	10	7	0.307		No se puede determinar.	
10:00					0.326		
9:00	20/12/2006	10	6.97	0.368		No se puede determinar.	
10:00					0.308		
9:00	21/12/2006	10	6.98	0.319		No se puede determinar.	
10:00					0.308		

**Nuevamente se vuelve alimentar con cal.**

Hora	Fecha	phe	phs	Abse	Abs1	Abs2	Abs3	Alcalinidad(ppm)
9:00	17/01/2007	11	7	0.364	0.180			No se realizó análisis
10:00						0.205		
9:00	18/01/2007	11	7	0.233	0.279			216
10:00						0.304		
9:00	19/01/2007	11	8	0.251	0.275			No se realizó porque era la misma agua del día anterior.
<b>10:00</b>						<b>0.286</b>		

## 5.4. Pruebas Experimentales. (2 últimas semanas)

Hora	Fecha	ph <sub>e</sub>	ph <sub>s</sub>	Abs <sub>e</sub>	Abs <sub>s1</sub>	Abs <sub>s2</sub>	Alcalinidad (ppm)
9:00	22/01/2007	10	7	0.198	0.141		212
10:00						0.148	
9:00	23/01/2007	6	6	0.246	0.171		Agua Acida
10:00						0.172	
9:00	24/01/2007	11	7	0.273	0.203		206
10:00						0.211	
9:00	25/01/2007	11	7	0.250	0.146		216
10:00						0.178	
9:00	26/01/2007	12	7	0.236	0.136		182
10:00						0.166	
9:00	30/01/2007	8	7	0.155	0.072		
10:00						0.070	
9:00	31/01/2007	9	7	0.275	0.110		
10:00						0.133	
9:00	01/02/2007	9	7	0.251	0.084		
10:00						0.083	
9:00	02/02/2007	9	7	0.178	0.078		
<b>10:00</b>						<b>0.087</b>	

Con la obtención de un período consecutivo del reactor, se obtuvieron estos datos que responden a una buena eficiencia de nuestro reactor piloto; sintiéndonos satisfechos, con los resultados obtenidos en los diferentes parámetros a investigarse y culminando de esta manera nuestra investigación práctica.

## 5.5. Sólidos Suspendidos Totales.

Aquí en esta prueba se toma 100 ml de muestra de agua,

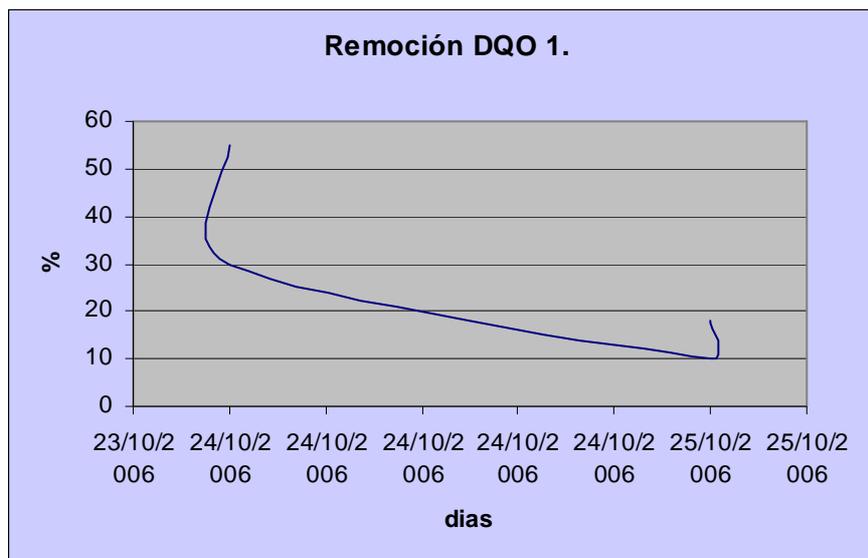
1. taramos el papel filtro
2. filtramos las 100 ml de agua
3. ponemos a secar la muestra en la estufa a 105 °C
4. volvemos a pesar el papel

$$\text{SST} = \frac{1.10077\text{gr}}{100\text{ml}} \times \frac{1000\text{ml}}{1\text{Lt}} = 11.077\text{gr / lt}$$

## 5.6 DATO CORREGIDO MEDIANTE LA CURVA DE LA GLUCOSA

Como se realizó las pruebas con disoluciones de 1 en 5, se tendrá que multiplicar el resultado por 5.

Hora	Fecha	Mg / L (E)	Mg / L (S1)	Mg / L (S2)	Mg / L (S3)	% remoción
9:00	24/10/2006	2070.48				
10:00			915			55
11:00				3577.35		42
12:00					1431.2	30
9:00	25/10/2006	1944.9				
10:00			2355.85			17
11:00				1739.45		10
12:00					1579.6	18
9:00	30/10/2006		El inconveniente, es que las personas del turno de la noche alimentaron el reactor de agua con soda, razón por la cual las bacterias murieron.			



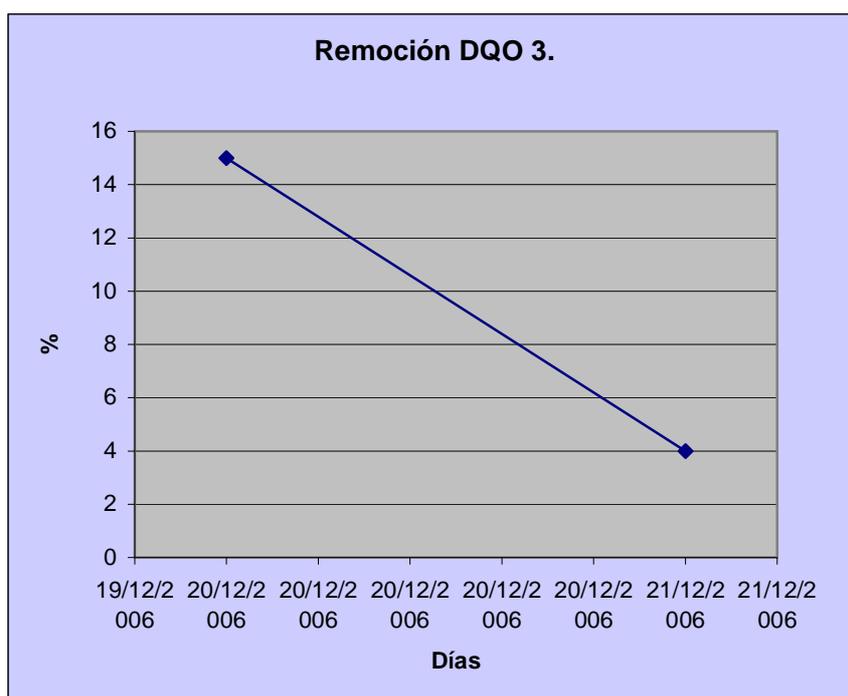
Mediante los valores observados, se puede concluir que hasta el 25 de octubre se obtuvieron valores casi estables tanto en ph, como en el % de remoción, aunque no eran tan viables; sin embargo el día 30 se nos presentó un inconveniente en la alimentación del agua hacia el reactor piloto; cuyos valores reincidieron en su totalidad en nuestro trabajo; razón por la cual se optó por realizar una nueva inoculación; para así poder conseguir datos más aceptables en nuestros parámetros a investigar.

Hora	Fecha	Mg / L (E)	Mg / L (S1)	Mg / L (S2)	% remoción
9:00	09/11/2006	2881			
10:00			3063.65		6
10:00	10/11/2006	2686.9	3189.2		15
11:00				3269.1	17
9:00	20/11/2006	3508.85			
9:35			3360.45		4
10:40				3451.75	2
9:00	21/11/2006	2675.5			
10:00			2892.4		7
9:00	22/11/2006	1876.4			
10:00			2869.55		34
11:00				3189.2	41
9:00	23/11/2006	1625.3	1956.3		17
10:00				2492.85	34
9:00	24/11/2006	2367.3	1990.55		16
10:00				3086.45	18
9:00	27/11/2006	3794.2			
10:00			3976.85		5
11:00				4045.35	6
9:00	29/11/2006	3862.7			
10:00			3428.9		11
9:00	30/11/2006	3782.8			
10:00			3623		4
9:00	01/12/2006	3714.3			
10:00			3577.35		4
9:00	02/12/2006	3349			
10:00			3223.45		4
9:00	06/12/2006	1944.9	1933.5		1



Se volvió a inocular: tomamos un nuevo **flujo 0.17 ml/seg.** Con los valores mostrados en esta tabla, se puede apreciar claramente que el reactor no está cumpliendo con el funcionamiento requerido; ya que nos dimos cuenta que se habían creado algas de color ojo; las cuales aumentan la DQO, dentro del reactor; lo cual al tomar las muestras para ser analizadas, daban como resultado valores muy altos en el DQO; razón por la cual se tuvo que pintar completamente el reactor, de color negro, para evitar el ingreso de la luz solar dentro del reactor; y de esta manera poder obtener óptimos resultados en el equipo.

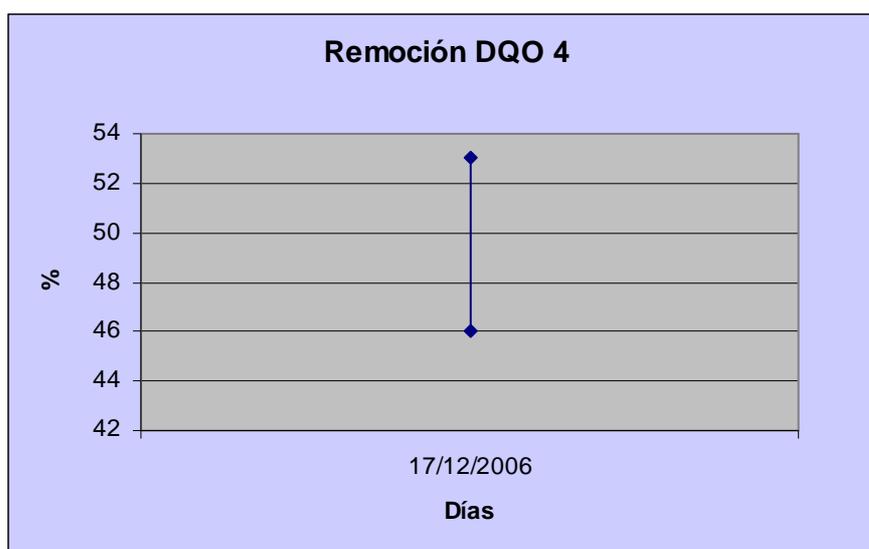
Hora	Fecha	Mg / L (E)	Mg / L (S1)	% remoción
9:00	13/12/2006	3349		
10:00			3760	11
9:00	14/12/2006	3303.35		
10:00			3520.25	6
9:00	20/12/2006	3899.7		
10:00			3314.75	15
9:00	21/12/2006	3440.35		
10:00			3314.75	4



Como podemos observar, los valores de mg/lit. difieren en cierto grado, por tal motivo se decidió cambiar la utilización de Cal por Carbonato de Sodio, con el fin de lograr una mejor eficiencia en el funcionamiento del reactor y así poder conseguir resultados más favorables para nuestra investigación.

Al ver que con el carbonato de sodio no se conseguía mayor eficiencia y no se podía hacer alcalinidad, se tuvo que continuar trabajando con la cal.

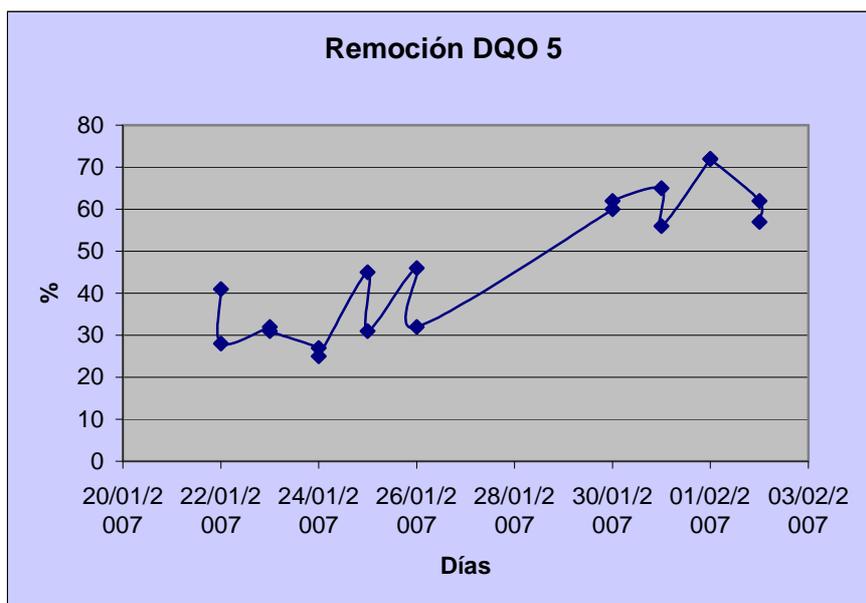
Hora	Fecha	Mg / L (E)	Mg / L (S1)	Mg / L (S2)	% remoción
9:00	17/01/2007	3954	1853.6		53
10:00				2138.95	46
9:00	18/01/2007	2458.6	2983.7		18
10:00				3269.1	25
9:00	19/01/2007	2664.1	2938.05		9
<b>10:00</b>				<b>3063.65</b>	<b>13</b>



Se retomó la utilización de la Cal, ya que el Carbonato de Sodio impedía la sedimentación del floc; por esto podemos denotar un ligero cambio en los resultados, la gráfica nos demuestra que todavía no se consigue una remoción considerable, por lo cual se optó realizar una nueva corrida; para así poder conseguir datos más satisfactorios en nuestra investigación.

Se tuvo que volver a inocular; ya que las bacterias no se recuperaron en su totalidad, motivo por el cual se realizó la limpieza total del equipo; de tal manera que se dió inicio a la puesta en marcha del reactor piloto con un nuevo flujo y nuevo lodo; para de esta manera lograr obtener un mejor porcentaje de remoción.

Hora	Fecha	Mg / L (E)	Mg / L (S1)	Mg / L (S2)	% remoción
9:00	22/01/2007	2060.27	1208.4		41
10:00				1488.3	28
9:00	23/01/2007	2562	1750.85		32
10:00				1762.25	31
9:00	24/01/2007	2915.25	2116.15		27
10:00				2207.45	25
9:00	25/01/2007	2652.65	1465.45		45
10:00				1830.75	31
9:00	26/01/2007	2492.85	1351.3		46
10:00				1693.75	32
9:00	30/01/2007	1568.2	620.7		60
10:00				597.9	62
9:00	31/01/2007	2988.05	1054.5		65
10:00				1317.05	56
9:00	01/02/2007	2664.05	757.7		72
10:00				746.3	72
9:00	02/02/2007	1830.75	689.2		62
<b>10:00</b>				<b>791.95</b>	<b>57</b>



## CAPITULO VI

### 6.1. ANÁLISIS Y RESULTADOS

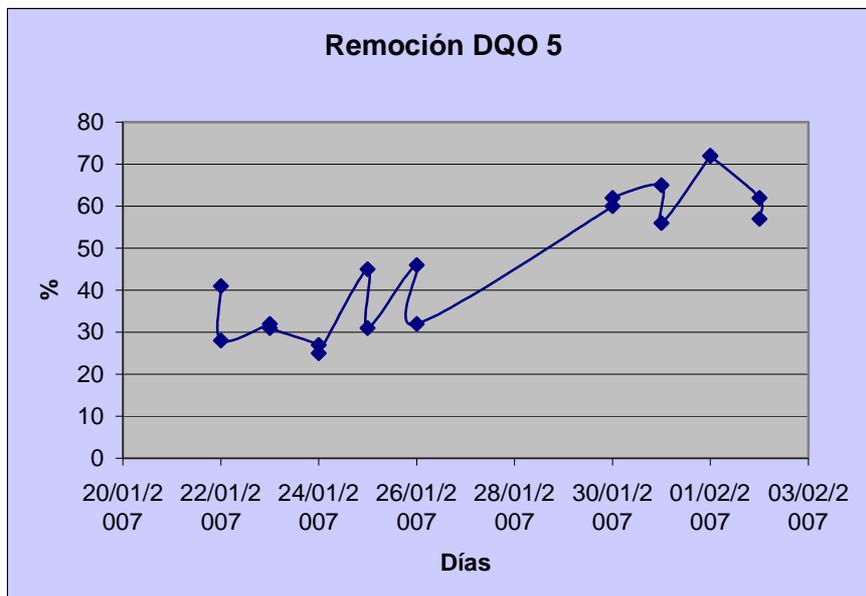
En los primeros días de arrancado el equipo empezó a reducir el DQO asta en un 32 %, pero al alimentarlo con aguas residuales con alta concentración de soda las bacterias murieron o se inactivaron, razón por la cual el DQO salía muchas veces mas alto que el de la entrada.

Al volver a inocular el porcentaje de remoción fue muy pequeño, aquí se presentó muchos inconvenientes como el crecimiento de algas; la cual al realizársele el DQO salía demasiado alto. Para solucionar este problema se tuvo que pintar el equipo, ya que este era transparente y los rayos del sol penetraban con facilidad al equipo y ayudaba al crecimiento de las algas.

Al ver que la remoción era muy poca y el crecimiento de las algas se volvió a inocular y se lavo todo el equipo en esta ultima parte de la fase experimental se obtuvo resultados muchos mejores y a medida que los días pasaban el porcentaje de remoción aumentaba llego a remover asta un 72 % a medida que las bacterias se adaptaban a ese medio mayor eficiencia tenían estas.

Al trabajar en un reactor continuo se corre el riesgo que uno de sus parámetros no se cumpla como es el pH o que la temperatura no sea la apropiada como para que las bacterias no trabajen o que no tenga la cantidad de nitrógeno adecuada (urea), como para que las bacterias se inactiven, ya que esta agua posee muy poco nitrógeno.

Con respecto a los resultados de las últimas 2 semanas podemos observar que los porcentajes de remoción van aumentando según el tiempo que transcurra llegando a remover un 72% como se muestra en la siguiente tabla:



<b>Hora</b>	<b>Fecha</b>	<b>% remoción</b>
9:00	22/01/2007	41
10:00		28
9:00	23/01/2007	32
10:00		31
9:00	24/01/2007	27
10:00		25
9:00	25/01/2007	45
10:00		31
9:00	26/01/2007	46
10:00		32
9:00	30/01/2007	60
10:00		62
9:00	31/01/2007	65
10:00		56
9:00	01/02/2007	72
10:00		72
9:00	02/02/2007	62
<b>10:00</b>		57

Se puede observar claramente, que estos valores muestran que la carga no es estable y aún varia constantemente; ya que puede venir con carga media o alta según sea el proceso.

## 6.2. CONCLUSIONES.

La elaboración de este proyecto en la empresa EXOFRUT, sirvió de gran ayuda, para la puesta en marcha del reactor principal, teniendo en cuenta los parámetros a controlar; esto demuestra que nuestra investigación cumplió con las expectativas deseadas, con respecto al normal funcionamiento de las bacterias en el tratamiento del agua residual y el arranque del reactor a escala. Entre las conclusiones que podemos acotar tenemos las siguientes:

**1.-** Al trabajar con un equipo piloto, podemos notar con mayor facilidad, los problemas que pudiesen presentarse en el reactor principal, razón por la cual se pudo determinar con mayor eficacia los parámetros requeridos por la investigación y estudio del mismo; tales como: pH, temperatura, alcalinidad, demanda química de oxígeno (DQO) y tiempo de retención hidráulica (TRH).

**2.-** Controlar los parámetros como son: el ph, el caudal (TRH apropiado) que causen la falla del reactor principal; ya que si el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) es muy bajo se vería afectada la eficiencia del reactor; motivo por el cual se debe realizar un análisis riguroso a la toma de muestra del agua a tratar; para determinar los valores permisibles de los mismos.

**3.-** Con la realización de este trabajo, se consiguió eliminar en su totalidad la descarga de agua ácida hacia el cuerpo de agua dulce.

**4.-** Los niveles de remoción del equipo piloto fueron de un 72% y el del reactor principal reactor principal una vez puesto en marcha fue de un 55%. La diferencia entre el reactor piloto y el reactor principal en niveles de remoción se debe a que en el reactor piloto los parámetros a controlar se mantenían estables como el ph y el caudal, el agua a tratar la tomábamos a la salida de la planta, le poníamos un ph adecuado para el reactor piloto y se dejaba en el tanque de alimentación con capacidad de 40 lt. la cual duraba asta el día siguiente con un ph fijo; para el caso del caudal teníamos una bomba dosificadora peristáltica la cual mantenía el caudal constante. En el caso del reactor principal las condiciones no son estables; ya que en la planta el caudal de agua varía constantemente habiendo momentos en el día que el caudal es demasiado alto y no queda otra opción que aumentar el caudal del reactor; disminuyendo así el tiempo de retención hidráulica (TRH) y en consecuencia afectando la eficiencia del reactor; para el caso del ph de esta agua varia entre **7 – 9** y como la variación del Ph es constante; también se verá afectado la eficiencia del reactor. En las siguientes tablas podemos exponer los valores obtenidos en el reactor piloto y principal; con respecto a los valores permisibles de los mismos.

### ANALISIS DEL REACTOR PILOTO.

Parámetro	Unidad	Resultado	*Limite Máximo Permisible
Potencial Hidrógeno	U ph	7	5-9
Temperatura	°C	28	< 35
Sólidos Suspendidos Totales	mg/lt.	11077	100
Demanda Bioquímica de Oxígeno. (DBO <sub>5</sub> )	mg. O <sub>2</sub> /lt	-----	100
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg. O <sub>2</sub> /lt	746.3	250
Aceites y Grasas	mg/lt.	-----	30

\* Texto Unificado de Legislación Ambiental, libro VI; de Calidad Ambiental. DE-3516.RO-E2: 31-Marzo-2003.Tabla 12.

### ANALISIS DEL REACTOR PRINCIPAL.

Parámetro	Unidad	Resultado	*Limite Máximo Permisible
Potencial Hidrógeno	U ph	6.85	5-9
Temperatura	°C	32.3	< 35
Sólidos Suspendidos Totales	mg/lt.	360	100
Demanda Bioquímica de Oxígeno. (DBO <sub>5</sub> )	mg. O <sub>2</sub> /lt	210	100
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg. O <sub>2</sub> /lt	313.5	250
Aceites y Grasas	mg/lt.	49.8	30

\* Texto Unificado de Legislación Ambiental, libro VI; de Calidad Ambiental. DE-3516.RO-E2: 31-Marzo-2003.Tabla 12.

Mediante estos valores mostrados en las tablas anteriores, podemos observar claramente que el sistema de tratamiento no alcanza los límites permisibles de descarga, siendo necesario complementar este tratamiento con otro; ya sea otro digestor pero en forma continua o una laguna facultativa; y de esta manera poder alcanzar los parámetros expuestos en la muy Ilustre Municipalidad de Guayaquil.

### **6.3. RECOMENDACIONES.**

Al parecer una de ellas, podría ser, que se debe controlar el pH del agua que ingresa al reactor, para evitar que el agua de salida se mantenga con el pH 3-4; nuestro trabajo se basa en proporcionar un pH ligeramente neutro al agua residual que puede estar entre 6.5-8; más no de expulsar un agua en las mismas condiciones de entrada al efluente.

Otra es, tener mucho control, al momento en que se alimente con el agua los tanques de almacenamiento, ya que no puede tener altas concentraciones de soda cáustica es decir 98%; puesto que esta mata las bacterias; de tal forma no se podría trabajar en el tratamiento de esta agua, para controlar la remoción del floc; por causa de la muerte de las bacterias.

No debemos olvidar que entre los compuestos que se le proporcionaba al agua para un mejor físico-químico, se eliminó el sulfato de aluminio a la entrada del reactor; ya que este impedía la sedimentación del floc; y se comenzó a poner en el agua cal, electrolitos y urea, para una mejor remoción, y de esta manera poder obtener los resultados deseados en el estudio y tratamiento de esta agua residual.

Se debe tener, muy en cuenta la proliferación de algas en le reactor; en nuestro caso cómo era transparente le daba mucho la luz, y esto produjo el crecimiento de algas color rojo; las cuales producían altas demandas de oxígeno, dentro del reactor; lo cual al tomar las muestras para ser analizadas, daban como resultado valores muy altos en el DQO; razón por la cual se tuvo que pintar completamente el reactor, de color negro, para así poder obtener óptimos resultados del reactor, al culminar las pruebas.

## CAPITULO VII

### **7.1. ANEXO 1.**

#### **Definiciones y Nomenclatura.**

**Aguas residuales:** Aguas utilizadas en las viviendas, industria y agricultura que se canalizan en el alcantarillado junto con el agua de lluvia y la que discurre por las calles.

**Bioacumulación.-** Proceso mediante el cual circulan y se van acumulando a lo largo de la cadena trófica una serie de sustancias tóxicas, las cuales pueden alcanzar concentraciones muy elevadas en un determinado nivel.

**Capacidad de Asimilación.-** Propiedad que tiene un cuerpo de agua para recibir y depurar contaminantes sin alterar sus patrones de calidad, referido a los usos para los que se define.

**Caracterización de un Agua Residual.-** Proceso destinado al conocimiento integral de las características estadísticas confiable del agua residual, integrado por la toma de muestras, medición de caudal e identificación de los componentes físicos, químicos, biológicos y microbiológicos

**Carga contaminantes.-** cantidad de un contaminante aportada en una descarga de aguas residuales, expresada en unidades de masa por unidades de tiempo.

**Carga máxima permisible.-** Es el límite de carga que puede ser aceptado en la descarga a un cuerpo receptor o a un sistema de alcantarillado.

**Carga Promedio.-** Es el promedio de la concentración promedio por el caudal promedio, determinados en el mismo sitio.

**Cuerpo Receptor o Cuerpo de Aguas.-** Es todo río, lago, laguna, agua subterráneas, cauce, depósito de agua, corriente, zona marina, estuarios, que sea susceptible de recibir directa o indirectamente la descarga de aguas residuales.

**DBO5:** Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días). Cantidad de oxígeno utilizado por una mezcla de población de microorganismos heterótrofos para oxidar compuestos orgánicos en la oscuridad a 20°C durante 5 días.

**Depuración.-** Es la remoción de sustancias contaminantes de las aguas residuales para disminuir su impacto ambiental.

**Desbaste:** Sistema de rejas y tamicas donde quedan retenidos los flotantes y residuos gruesos que arrastra consigo el agua “bruta” o influente en las estaciones regeneradoras.

**Descarga.-** Acción de verter, infiltrar, depositar o inyectar agua residuales a un cuerpo receptor a un sistema de alcantarillado en forma continua, intermitente o fortuita.

**Descarga no Puntuada.-** Es aquella en la cual se puede precisar el punto exacto de vertimiento al cuerpo receptor, tal es el caso de descargas provenientes de escorrentía, aplicación de agroquímicos u otros similares.

**Digestión Anaerobia:** Tratamiento biológico anóxico del fango procedente de los decantadores secundarios y primarios previo a su secado y eliminación, y que se desarrolla con la producción de gas, fundamentalmente metano.

**Efluente.-** Líquido proveniente de un proceso de tratamiento, proceso productivo o de una actividad.

**ERAR:** Estación Regeneradora de Aguas Residuales. Plantas de tratamiento de las aguas residuales.

**Eutrofización:** Aumento de nutrientes en el agua que, en general, conlleva un excesivo desarrollo de algas y microorganismos consumidores de oxígeno que afectan principalmente a la vida de la fauna acuática habitual.

**Flóculo:** Unidad ecológica y estructural del fango activo formada por una agrupación de bacterias y otros microorganismos que permiten la oxidación de la materia orgánica en las balsas de activación.

**F / M.** - Relación comida / microorganismo.

**Licor de Mezcla:** Homogeneizado del agua residual con los

**Oxígeno disuelto.-** Es el oxígeno suelto que se encuentra en el agua, vital para la vida acuática y para la prevención de olores.

**Polución o contaminación del agua.-** Es la presencia en el agua de contaminantes en concentraciones y permanencia superior o inferior a las establecidas en la legislación vigente capaz de deteriorar la calidad de agua.

**Polución Térmica.-** Descarga de agua a mayor o menor temperatura que aquella que se registra en el cuerpo receptor al momento del vertido, proveniente de sistemas industriales o actividades humanas.

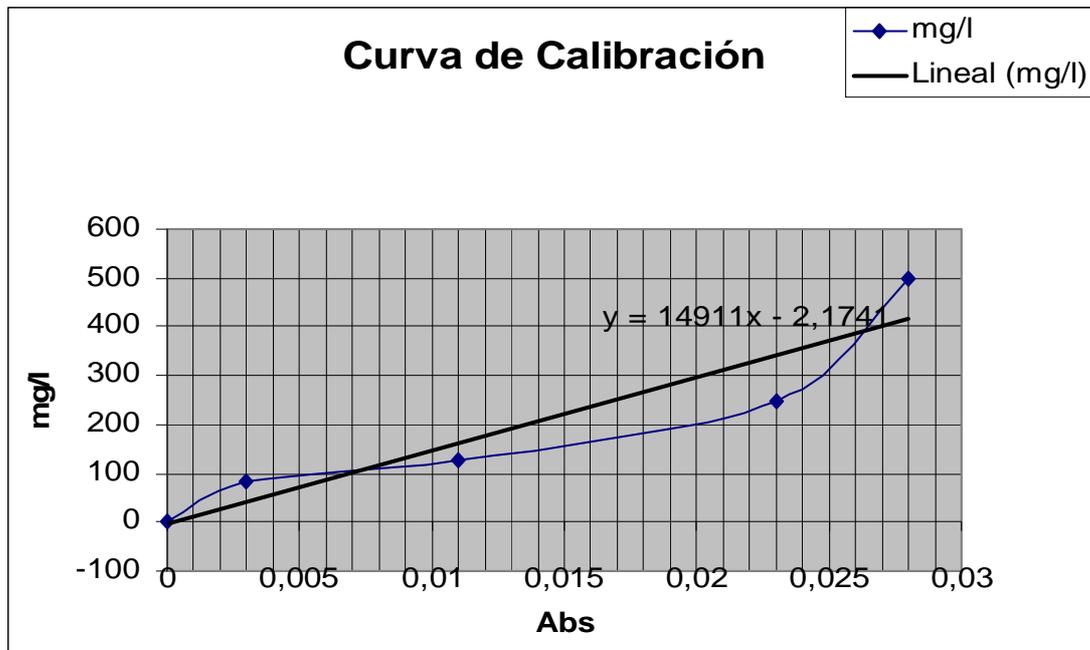
**Toxicidad.-** Se considera tóxica a una sustancia o materia cuando debido a su cantidad, concentración o características físicas químicas o infecciosas presente potencial.

**Toxicidad en agua.-** Es la propiedad de una sustancia, elemento o compuesto, de causar efecto letal u otro efecto nocivo en 4 días a los organismos utilizados para el bioensayo acuático.

## 7.2. ANEXO 2.

### CURVA DEL PHTHALATE

Abs	mg/l
0,028	500
0,023	250
0,011	125
0,003	83,333
0	0



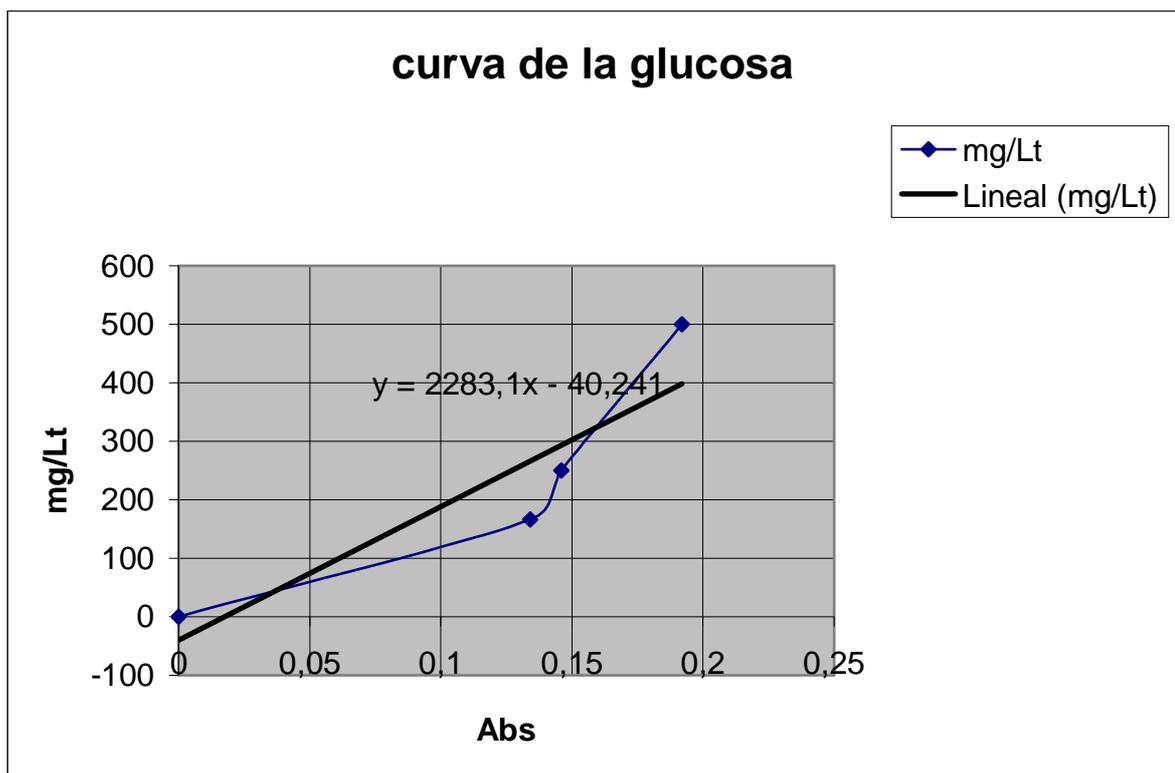
Ecuación de la curva del PHTHALATE

$$\underline{\underline{Y = 14911X - 2.1741}}$$

### 7.3 ANEXO 3.

#### CURVA DE LA GLUCOSA

Abs	mg/Lt
0,192	500
0,146	250
0,134	166,66
0	0



Ecuación de la curva de la glucosa

$$\underline{\underline{Y = 2283.1X - 40.241}}$$

## 7.4. ANEXO 4.

### FOTOS DEL EQUIPO E INSTRUMENTOS UTILIZADOS.

#### Reactor Anaerobio Continuo.



En esta imagen podemos observar, el reactor armado, el cual consta de: cuerpo cilíndrico, una campana para evitar la salida del lodo por el efluente, consta de un relleno a base de anillos plásticos, de unas mangueras a diferentes nivel de altura; para poder tomar muestras, una bomba dosificadora y un balde de alimentación.

## Reactor Anaerobio Continuo Funcionando



Aquí se puede ver el reactor funcionando, su aspecto se debe que el lodo se está lavando y a medida que pasa los días el agua comienza aclarar.

## Reactor Anaerobio Continúo Funcionando



En esta imagen, notamos más clara el agua del reactor, estas condiciones se deben a que han pasado 2 días desde su inoculación.

## Reactor Anaerobio Continuo



En esta ocasión, se tuvo que pintar el reactor; para evitar el crecimiento de algas, el proceso en su interior continúa sin problema.

**ACUMULACIÓN DE CRISTALES PRODUCIDAS POR LAS BACTERIAS**



**PRODUCCION DE GAS EN LA PARTE SUPERIOR DEL DIGESTOR**



## DISTRIBUIDOR DE AGUA COLOCADO EN EL FONDO DEL REACTOR



Se colocaron, para poder distribuir de manera proporcional el agua en el interior del reactor.

## REACTOR HACH



En este equipo se colocan los viales, para poder incubarse.

## FOTOCOLORIMETRO.



En este equipo colocamos uno a uno los viales, para poder leer en absorbancia.



## BIBLIOGRAFIA

- ◆ Tratamiento de Aguas Residuales, R.S. Ramallo.
- ◆ Ingeniería en Aguas Residuales Vol. 1-2 (III Edición). Autor: Metcalf y Eddy
- ◆ Tesis 967.
- ◆ <http://www.biologia.org/?pid=5000&page=0&id=93>
- ◆ [www.lennetechwatertreatment.com](http://www.lennetechwatertreatment.com)
- ◆ "[http://es.wikipedia.org/wiki/Tratamiento de aguas residuales](http://es.wikipedia.org/wiki/Tratamiento_de_aguas_residuales)"
- ◆ [www.NTP128estacionesdepuradorasdeaguasresiduales.com](http://www.NTP128estacionesdepuradorasdeaguasresiduales.com)
- ◆ [www.aqualimpia/depuracióndeaguasresiduales.com](http://www.aqualimpia/depuracióndeaguasresiduales.com)
- ◆ [www.scielo.serial/mc/v3n1/body/art\\_05.htm](http://www.scielo.serial/mc/v3n1/body/art_05.htm)
- ◆ <http://www.unavarra.es/genmic/curso%20microbiologia%20general/40-tratamiento%20aguas%20residuales.htm>
- ◆ [http://www.aqualimpia.com/Planificacion%20y%20Construccion%20de%20Plantas%20Depuradoras\\_Biodigestores.htm](http://www.aqualimpia.com/Planificacion%20y%20Construccion%20de%20Plantas%20Depuradoras_Biodigestores.htm)
- ◆ <http://www.olivacordobesa.com/TRATAMIENTO%20DE%20AGUAS%20RESIDUALES.pdf>
- ◆ c:\scielo\web\htdocs\classScieloBase.php on line 426
- ◆ <http://html.rincondelvago.com/aguas-residuales-urbanas.html>
- ◆ [http://www.paginasprodigy.com/bservinm/aguas\\_residuales.htm#\\_Hlk454018702](http://www.paginasprodigy.com/bservinm/aguas_residuales.htm#_Hlk454018702)

