

# **Capítulo I**

## **NATURALEZA DEL AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA Y SU TRATAMIENTO**

### **1.1 Agua Residual.**

Se entiende por aguas residuales aquellas que han sido utilizadas con un fin consuntivo, incorporando a ellas sustancias que deterioran su calidad original (contaminación), disminuyendo su potencialidad de uso.

Las aguas residuales más comunes corresponden a:

#### **Aguas residuales domésticas (aguas servidas).**

Son las aguas de origen principalmente residencial (desechos humanos, baños, cocina) y otros usos similares que en general son recolectadas por sistemas de alcantarillado en conjunto con otras actividades (comercial, servicios, industria). Esta agua tienen un contenido de sólidos inferior al 1%. Si bien su caudal y composición es variable, pueden tipificarse ciertos rangos para los parámetros más característicos.

#### **Aguas residuales industriales (residuos industriales líquidos).**

Son aguas provenientes de los procesos industriales y la cantidad y composición de ellas es bastante variable, dependiente de la actividad productiva y de muchos otros factores (tecnología empleada, calidad de la materia prima, etc.). Así estas aguas pueden variar desde aquellas con alto contenido de materia orgánica biodegradable (mataderos, industria de alimentos), otras con materia orgánica y compuestos químicos (curtiembre, industria de celulosa) y finalmente industrias cuyas aguas residuales contienen sustancias inorgánicas u orgánicas no degradables (metalúrgicas, textiles, químicas, mineras).

## **Aguas de lluvias.**

La escorrentía generada por aguas de lluvias es menos contaminada que las aguas residuales domésticas e industriales, y su caudal mayor. La contaminación mayor se produce en las primeras aguas que lavan las áreas por donde escurre.

### **1.1.1 Principales características de las aguas residuales.**

Estas características de las aguas residuales son parámetros importantes para el tipo de tratamiento, así como para la gestión técnica de la calidad ambiental.

#### **1.1.1.1 Características físicas.**

##### **Temperatura.**

La temperatura de las aguas residuales es mayor que la de las aguas no contaminadas, debido a la energía liberada en las reacciones bioquímicas, que se presentan en la degradación de la materia orgánica. Las descargas calientes son otra causa de este aumento de temperatura.<sup>(1)</sup>

##### **Turbidez.**

La turbidez, medida de la propiedad de transmisión de la luz del agua, es otro ensayo utilizado para indicar la calidad de los vertidos de aguas residuales con respecto a la materia suspendida.<sup>(4)</sup>

##### **Color.**

El color es un indicativo de la edad de las aguas residuales. El agua residual reciente suele ser gris; sin embargo, a medida que los compuestos orgánicos son descompuestos por las bacterias, el oxígeno disuelto en el agua residual se reduce y el color cambia a negro. En esta condición, se dice que el agua residual es séptica.<sup>(4)</sup>

##### **Olor.**

El olor es debido a los gases producidos en la descomposición de la materia orgánica, sobre todo, a la presencia de ácido sulfhídrico y otras sustancias volátiles. El agua residual reciente tiene un olor peculiar algo desagradable, pero más tolerable que el del agua residual séptica.<sup>(4)</sup>

##### **Sólidos Totales.**

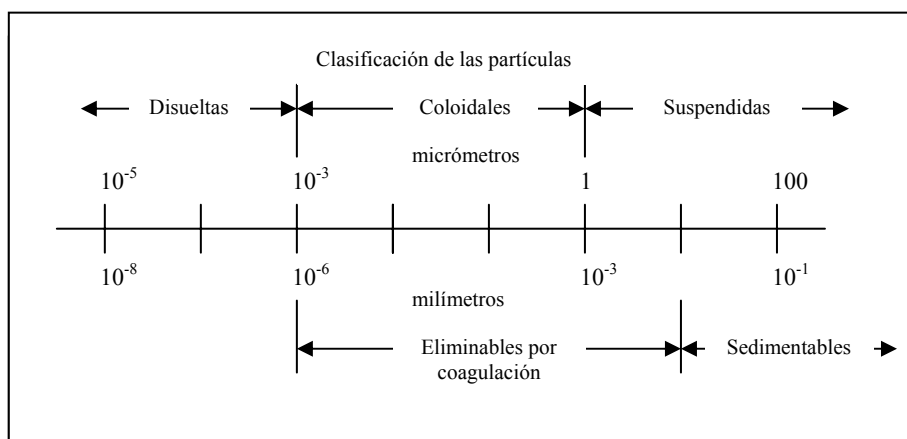
Los sólidos totales presentes en el agua residual se clasifican según su tamaño o presentación en sólidos suspendidos y sólidos filtrables.

Sólidos suspendidos: son las partículas flotantes, como trozos de vegetales, animales, basuras, etc., y aquellas otras que también son perceptibles a simple vista y tienen posibilidades de ser separadas del líquido por medios físicos sencillos. Dentro de los sólidos suspendidos se pueden distinguir los sólidos sedimentables, que se depositarán por

gravedad en el fondo de los receptores. Estos sólidos sedimentables, son una medida aproximada de la cantidad de fango que se eliminará mediante sedimentación.<sup>(4)</sup>

Sólidos filtrables: esta fracción se compone de sólidos coloidales y disueltos. La fracción coloidal consiste en partículas con un diámetro aproximado que oscila entre  $10^{-3}$  y 1 micra (figura 1.1). Esta fracción no puede eliminarse por sedimentación. Los sólidos disueltos se componen de moléculas orgánicas, moléculas inorgánicas e iones que se encuentran disueltos en el agua. Por lo general, se requiere una coagulación seguida de sedimentación para eliminar estas partículas de la suspensión.<sup>(4)</sup>

Figura 1.1. Clasificación de las partículas sólidas contenidas en un agua residual, según su diámetro.



### 1.1.1.2 Características químicas.

Las características químicas estarán dadas, principalmente, en función de los desechos que ingresan al agua servida.

#### Materia Orgánica.

La materia orgánica está compuesta en un 90% por carbohidratos, proteínas, grasas y aceites provenientes de excrementos y orina de seres humanos, restos de alimentos y detergentes. Estos contaminantes son biodegradables, es decir, pueden ser transformados en compuestos más simples por la acción de microorganismos naturales presentes en el agua, cuyo desarrollo se ve favorecido por las condiciones de temperatura y nutrientes de las aguas residuales domésticas.<sup>(3)</sup> La urea, principal constituyente de la orina, es otro importante compuesto orgánico del agua residual. En razón de la rapidez con que se descompone, la urea es raramente hallada en un agua residual que no sea muy reciente.

El agua residual contiene también pequeñas cantidades de moléculas orgánicas sintéticas como agentes tensoactivos, fenoles y pesticidas usados en la agricultura.<sup>(4)</sup>

## Materia inorgánica.

Se incluyen en este grupo todos los sólidos de origen generalmente mineral, como son sales minerales, arcillas, lodos, arenas y gravas no biodegradables. En la tabla 1.1 se presenta la relación entre algunos constituyentes inorgánicos y el agua residual.

Tabla 1.1. Relación entre algunos constituyentes inorgánicos y el agua residual.

Elemento	Relación con el agua residual
Hidrógeno (pH)	El intervalo de concentración idóneo para la existencia de la mayoría de la vida biológica es muy estrecho y crítico. El agua residual con una concentración adversa de ion hidrógeno es difícil de tratar por medios biológicos. Por lo general, el pH óptimo para el crecimiento de los organismos se encuentra entre 6.5 y 7.5.
Cloruros	Proceden de la disolución de suelos y rocas que los contienen y que están en contacto con el agua, intrusión del agua salada (zonas costeras), agua residual doméstica, agrícola e industrial. Suministra información sobre el grado de concentración del agua residual.
Nitrógeno	Nutriente esencial para el crecimiento de protistas y plantas. Básico para síntesis de proteínas.
Fósforo	Incrementa la tendencia de proliferación de algas en el receptor. Íntimamente ligado, igual que el nitrógeno, al problema de la eutrofización. <sup>(4)</sup>
Azufre	Requerido en la síntesis de las proteínas y liberado en su degradación.

## Gases.

Las aguas residuales contienen diversos gases con diferente concentración.

Oxígeno disuelto: es el más importante, y es un gas que va siendo consumido por la actividad química y biológica. La presencia de oxígeno disuelto en el agua residual evita la formación de olores desagradables. La cantidad de oxígeno disuelto depende de muchos factores, como temperatura, altitud, movimientos del curso receptor, actividad biológica, actividad química, etc. <sup>(2)</sup>

Ácido sulfhídrico: se forma por la descomposición de la materia orgánica que contiene azufre o por la reducción de sulfitos y sulfatos minerales. Su presencia, que se manifiesta fundamentalmente por los olores que produce, es un indicativo de la evolución y estado de un agua residual. <sup>(4)</sup>

Anhídrido carbónico: se produce en la fermentación de los compuestos orgánicos de las aguas residuales negras. <sup>(2)</sup>

Metano: se forma en la descomposición anaerobia de la materia orgánica por la reducción bacteriana del CO<sub>2</sub>. <sup>(2)</sup>

Otros gases: se producen además gases malolientes, como ácidos grasos volátiles y otros derivados del nitrógeno.<sup>(2)</sup>

### 1.1.1.3 Características Biológicas.

Estas características están definidas por la clase de microorganismos presentes en el agua, entre los cuales tenemos:

#### **Bacterias.** <sup>(2)</sup>

Juegan un papel fundamental en la descomposición y estabilización de la materia orgánica. Pueden clasificarse, en base a su metabolismo, en heterótrofas y autótrofas. Las bacterias autótrofas son aquellas que se nutren de compuestos inorgánicos, tomando la energía necesaria para sus biosíntesis a partir de la luz (bacterias fotosintéticas: familia *Thiorhodaceae*, *Chlorobiaceae*) o a partir de ciertas reacciones químicas (bacterias quimiosintéticas: *Nitrobacter*, *Nitrosomonas*, *Hydrogenomonas*, *Thiotrix*). En el tratamiento biológico de las aguas residuales, las bacterias heterótrofas constituyen el grupo más importante, por su necesidad de compuestos orgánicos para el carbono celular. Las bacterias autótrofas y heterótrofas pueden dividirse, a su vez, en anaerobias, aerobias, o facultativas, según su necesidad de oxígeno.

Bacterias anaerobias: son las que consumen oxígeno procedente de los sólidos orgánicos e inorgánicos y la presencia de oxígeno disuelto no les permite subsistir. Los procesos que provocan son anaerobios, caracterizados por la presencia de malos olores.

Bacterias aerobias: son aquellas que necesitan oxígeno procedente del agua para su alimento y respiración. El oxígeno disuelto que les sirve de sustento es el oxígeno libre (molecular) del agua, y las descomposiciones y degradaciones que provocan sobre la materia orgánica son procesos aerobios, caracterizados por la ausencia de malos olores.

Bacterias facultativas: algunas bacterias aerobias y anaerobias pueden llegar a adaptarse al medio opuesto, es decir, las aerobias a medio sin oxígeno disuelto y las anaerobias a aguas con oxígeno disuelto.

Bacterias coliformes: bacterias que sirven como indicadores de contaminantes y patógenos. Son usualmente encontradas en el tracto intestinal de los seres humanos y otros animales de sangre caliente. Las bacterias coliformes incluyen los géneros *Escherichia* y *Aerobacter*.

#### **Algas.**

En los estanques de estabilización, son un valioso elemento porque producen oxígeno a través del mecanismo de la fotosíntesis.

Las algas, al igual que sucede con otros microorganismos, requieren compuestos inorgánicos para reproducirse. A parte del anhídrido carbónico, los principales nutrientes necesarios son el nitrógeno y el fósforo. También son muy importantes vestigios de otros elementos (oligoelementos) como hierro, cobre, etc. Las algas pueden presentar el inconveniente de reproducirse rápidamente, debido al enriquecimiento del agua

(eutrofización) y crear grandes colonias flotantes originando problemas a las instalaciones y al equilibrio del sistema.<sup>(4)</sup>

Los tipos más importantes de algas de agua dulce son: verdes (*Chlorophyta*), verdes móviles (*Volvocales euglenophyta*), verdiamarillas o marrón dorado (*Chrysophyta*) y verdiazules (*Cyanophyta*).

#### 1.1.1.4 Demanda química de oxígeno (DQO).

Es la cantidad de oxígeno requerida para oxidar químicamente los materiales orgánicos presentes en una muestra de agua. Esta oxidación degrada el material orgánico biodegradable y no biodegradable.

#### 1.1.1.5 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

El parámetro de polución orgánica más utilizado y aplicable a las aguas residuales y superficiales es la DBO a los 5 días (DBO<sub>5</sub>). Supone esta determinación la medida del oxígeno disuelto utilizado por los microorganismos en la oxidación bioquímica de materia orgánica biodegradable. La medida de la DBO es importante en el tratamiento de aguas residuales y para la gestión técnica de la calidad de agua porque se utiliza para determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica.<sup>(4)</sup>

En la tabla 1.2, se presentan datos típicos de los constituyentes encontrados en un agua residual doméstica.

Tabla 1.2. Composición típica de una agua residual doméstica.

Componente	Intervalo de concentraciones		
	Alta	Media	Baja
Materia sólida, mg/l	1200	720	350
disuelta total	850	500	250
inorgánica	525	300	145
orgánica	325	200	105
en suspensión	350	220	100
inorgánica	75	55	20
orgánica	275	165	80
Sólidos decantables, ml/ l	20	10	5
DBO <sub>5</sub> a 20°C, mg/ l	400	220	110
Carbono orgánico total, mg/ l	290	160	80
DQO, mg/ l	1000	500	250
Nitrógeno, mg/ l N, total	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoníaco	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
Fósforo, mg/ l P, total	15	8	4
orgánico	5	3	1
inorgánico	10	5	3
Cloruros	100	50	30
Alcalinidad, mg/ l CaCO <sub>3</sub>	200	100	50
Grasa, mg/l	150	100	50

Metcalf-Eddy. "Tratamiento y depuración de las aguas residuales". 1991

## **1.2 Tratamiento de aguas residuales domésticas.**

Uno de los aspectos a considerar a la hora de realizar un vertido es que no se supere el poder de autodepuración del medio receptor para evitar efectos indeseables que dan lugar a una peor calidad.

Un sistema de tratamiento o estación depuradora de aguas residuales (EDAR) es una instalación donde el agua sucia, o residual, es sometida a un proceso mediante el cual por una combinación de diversos tratamientos físicos, químicos y/o biológicos se consigue eliminar la materia en suspensión, así como las sustancias coloidales y finalmente las sustancias disueltas que contiene. Todo esto para alcanzar unos niveles acordes con la normativa vigente y proporcionar una correcta integración de esta agua residual con el entorno, y obtener los mejores rendimientos posibles.<sup>(5)</sup>

El tipo de tratamiento depende de las características del residuo líquido. Las aguas de desecho provenientes de usos industriales, requerirán tratamientos más exigentes que los necesarios para los de origen doméstico; así mismo, las provenientes de uso agropecuario requerirán tratamientos especiales por la presencia de residuos orgánicos en concentraciones considerables. En algunos casos las aguas pueden ser tratadas en una sola planta, de acuerdo a sus características y según consideraciones económicas.

### **1.2.1 Tratamiento preliminar.**

El tratamiento preliminar o pretratamiento, es un proceso que se sitúa en cabecera y tiene como objetivo eliminar, de las aguas residuales, todos aquellos elementos de tamaño considerable que por su acción mecánica pueden afectar al funcionamiento del sistema depurador, así como las arenas y elementos minerales que puedan originar sedimentación a lo largo de las conducciones.

Los pretratamientos para aguas residuales domésticas más frecuentes son:

- Desbaste (rejas).
- Desarenado.

#### **1.2.1.1 Desbaste.**

El desbaste mediante rejas es una operación sencilla pero llamativa, ya que en ella, se retienen los sólidos de gran tamaño. Estos sólidos son una verdadera muestra de la actividad que se ha realizado en la población unas horas antes pues, en su mayoría, proceden de los restos que se arrojan por los inodoros y los fregaderos urbanos. Así, encontramos desde restos de comida hasta pelos, plásticos, trozos de cristales, etc.<sup>(5)</sup>

En el canal de entrada del agua a una planta de tratamiento es habitual encontrar una reja, constituida por barras paralelas que forman un ángulo de 30° a 80° respecto a la superficie del agua, aunque también las hay horizontales y verticales. En esta reja quedarán retenidos todos aquellos cuerpos voluminosos, flotantes y en suspensión, arrastrados por el agua y cuyas dimensiones superen la luz de paso de la reja.

Así mismo, el canal de rejillas se debe proyectar de forma que se evite la acumulación y sedimentación de arenas y otros materiales pesados. Para ello se recomiendan velocidades superiores a 0.4 m/s. No obstante, esta velocidad no deberá superar los 0.9 m/s para evitar el arrastre de basuras a través de las rejillas.<sup>(5)</sup>

Luego de las rejillas se pueden colocar tamices, con aberturas menores para remover un porcentaje más alto de sólidos, con el fin de evitar atascamiento de tuberías, filtros biológicos, con una abertura máxima de 2.5 mm.<sup>(1)</sup>

### **1.2.1.2 Desarenado.**

El proceso de desarenado se utiliza para separar la arena arrastrada en suspensión por el afluente. En el tratamiento de aguas residuales se catalogan como arenas aquellas sustancias sólidas densas formadas por gravas, arenas, cenizas y otros materiales (diámetro  $\geq 2.2$  mm y peso específico  $\geq 1.5$  g/ml), no putrescibles y con una velocidad de sedimentación notablemente superior a la de los sólidos orgánicos putrescibles. La densidad media de este tipo de materiales se encuentra en torno a  $1600 \text{ Kg/m}^3$ .<sup>(5)</sup>

El tipo de desarenador, según el procedimiento utilizado en la separación, más común es el de flujo horizontal, que realiza una separación natural por decantación. Este tipo de desarenador se verá de una manera más detallada en el capítulo siguiente.

### **1.2.2 Tratamiento Primario.**

El principal objetivo del tratamiento primario es remover aquellos contaminantes que pueden sedimentarse, como los sólidos sedimentables y algunos sólidos suspendidos, o aquellos que pueden flotar como las grasas.

#### **1.2.2.1 Sedimentación Primaria.**

La mayor parte de las sustancias en suspensión y disolución en las aguas residuales no pueden retenerse, por razón de su finura o densidad, en las rejillas y desarenadores. Por ello se recurre a la sedimentación (también llamada decantación) que es la separación de un sólido del seno de un líquido por efecto de la gravedad. La decantación se produce reduciendo la velocidad de circulación de las aguas residuales, con lo que el régimen de circulación se vuelve, cada vez, menos turbulento y las partículas en suspensión se van depositando en el fondo del sedimentador.<sup>(5)</sup>

Se realiza en tanques rectangulares o cilíndricos donde se remueve aproximadamente el 65% de los sólidos suspendidos y el 35% de la DBO presente en las aguas residuales. Los lodos producidos están conformados por partículas orgánicas.

Los lodos de un sedimentador primario son diferentes a los lodos de un desarenador los cuales son de tipo inorgánico. Las grasas y espumas que se forman sobre la superficie del sedimentador primario son removidas por medio de rastrillos que ejecutan un barrido superficial continuo.

Los lodos que son sedimentados en un sedimentador primario se llaman lodos primarios, los cuales se recogen del fondo con rastrillos para luego ser sometidos a una digestión.<sup>(1)</sup>



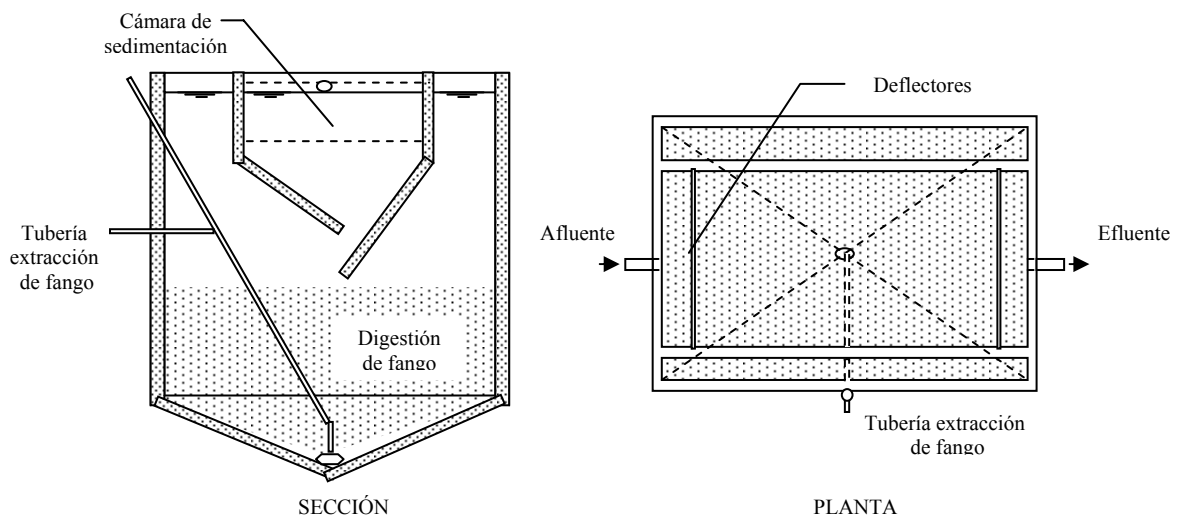
### 1.2.2.2 Tanques de Imhoff:

Se utiliza con el fin de efectuar simultáneamente una sedimentación y una digestión anaeróbica. Utilizado para el tratamiento primario en combinación con otro tratamiento secundario. Consta de 2 cámaras: la superior o cámara de sedimentación, por la que pasan las aguas negras a una velocidad muy reducida, permitiendo el asentamiento de la materia en suspensión; y la cámara inferior o de digestión, en la cual se desarrolla la digestión anaerobia de la materia sedimentada. <sup>(4)</sup>

El fondo de la cámara de sedimentación está conformado por dos losas inclinadas que en su parte más baja se traslapan, dejando un espacio a través del cual los sólidos asentados pasan a la cámara inferior, aislando así las condiciones sépticas y malos olores provenientes de la digestión de lodos y evitando el contacto con las aguas negras que pasan por la cámara de sedimentación.

El piso de la cámara de digestión forma una tolva de donde los lodos ya digeridos son extraídos para su tratamiento. <sup>(1)</sup> En la figura 1.2, se muestra un esquema del tanque Imhoff.

Figura 1.2. Esquema del tanque Imhoff.



### 1.2.3 Tratamiento Secundario.

El tratamiento secundario tiene como objetivo la eliminación de la materia orgánica biodegradable no sedimentable (materia orgánica finamente dividida y disuelta en el agua residual), junto a otros varios contaminantes. Básicamente, consiste en provocar el crecimiento de microorganismos que asimilan la materia orgánica, los cuales se reproducen y originan nuevos microorganismos insolubles que después son separados del flujo tratado como un fango destinado a una digestión definitiva o a la reutilización como enmienda del terreno. De hecho, se trata de una aplicación controlada de los sistemas naturales de autodepuración de las aguas, por lo que a este tipo de tratamiento se le llama tratamiento biológico. <sup>(5)</sup>

Un tratamiento secundario remueve aproximadamente un 85% de la DBO y los sólidos suspendidos aunque no remueve cantidades significativas de nitrógeno y fósforo, metales pesados y bacterias patógenas.

En el tratamiento secundario de tipo biológico, la materia orgánica es utilizada como alimento de los microorganismos tales como hongos, bacterias, protozoos, rotíferos, etc., de tal manera que ésta es transformada en  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  y un nuevo material celular.

Además de los microorganismos y materia orgánica es necesario hablar de oxígeno biodegradable ò DBO, y ciertas condiciones favorables como el pH, y un adecuado tiempo de contacto.<sup>(6)</sup>

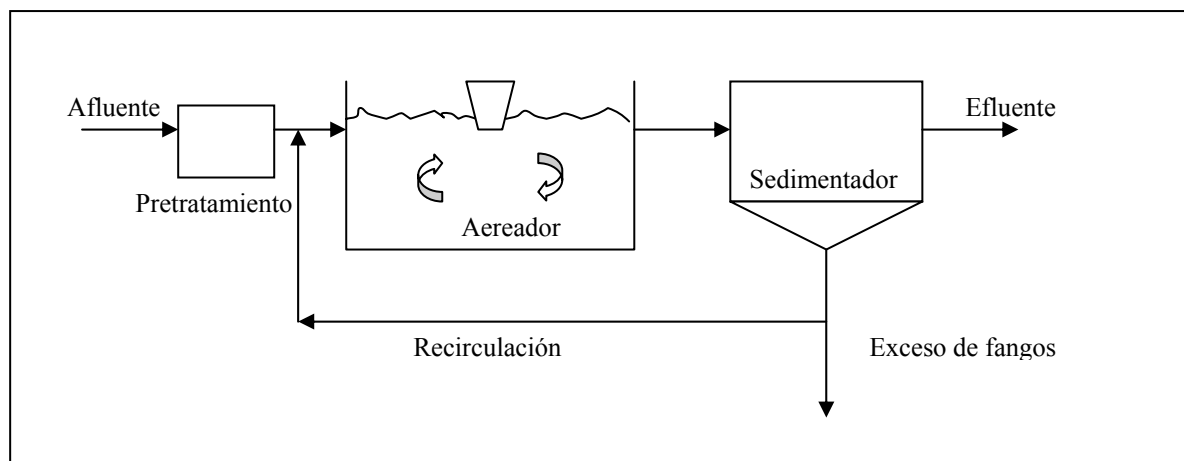
### 1.2.3.1 Lodos Activados.

Los lodos activados es una proceso de tratamiento por el cual, el agua residual y el lodo biológico (microorganismos) son mezclados y aerados en un tanque denominado areador. Los flóculos biológicos formados en este proceso se sedimentan en un tanque sedimentador, de donde son recirculados nuevamente al tanque areador o de aeración. En el proceso de lodos activados, los microorganismos son completamente mezclados con la materia orgánica en el agua residual de manera que ésta les sirve de alimento para su producción.

Es importante indicar que la mezcla o agitación se efectúa por medios mecánicos (aeradores superficiales, sopladores, etc.) los cuales tiene doble función: producir una mezcla completa y agregar oxígeno al medio para que el proceso se desarrolle.

La representación esquemática del proceso se muestra en la figura 1.3 mostrada a continuación.

Figura 1.3. Representación esquemática del proceso de fangos activados.



### 1.2.3.2 Lagunas de estabilización.

También llamadas estanques de estabilización, son grandes embalses donde la carga orgánica del afluente es depurada por la acción de microalgas y bacterias saprófitas, principalmente.

Para la disposición apropiada de aguas residuales, su tratamiento mediante lagunas de estabilización, constituye un sistema natural, que ofrece costos mínimos de operación, por lo cual es reconocido como el más adecuado para las condiciones económicas de

poblaciones de bajos recursos financieros. El proceso se convierte en una solución de costo mínimo al problema de salud humana. Este tipo de tratamiento constituye también una buena solución para pequeñas comunidades de clima cálido o templado (la temperatura tiene una notable influencia sobre la cinética del proceso).

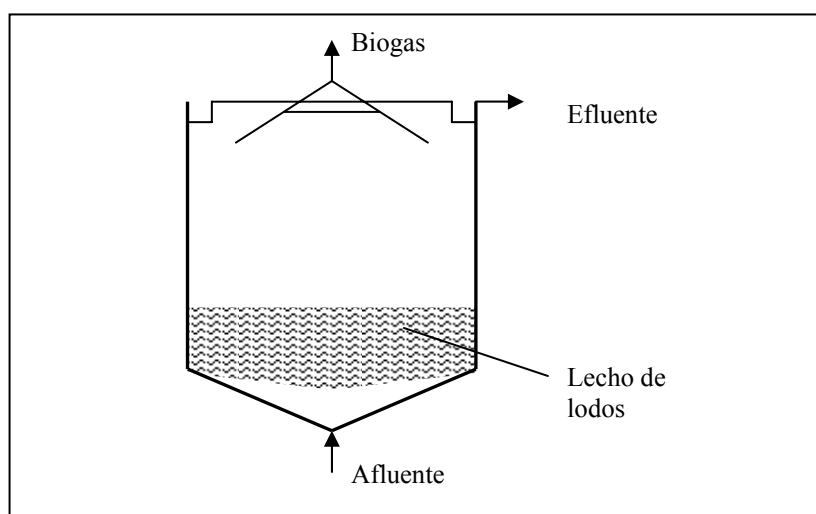
### 1.2.3.3 Lecho de lodos. (UASB)

Son reactores anaerobios denominados UASB (“Upflow Anaerobis Sludge Blanket” o Manto de Fango de Flujo Ascendente).<sup>(5)</sup>

En el interior de estos reactores (figura 1.4) se favorece la formación de flóculos o agregados de bacterias; al realizarse la alimentación del afluente por la parte inferior y generarse gases (principalmente CO<sub>2</sub> y metano), estos flóculos pueden mantenerse en suspensión. Tanto el gas libre como las partículas a las que se ha adherido el gas, ascienden hacia la parte superior del reactor donde se produce la liberación de este gas adherido, al entrar en contacto con unos deflectores desgasificadores. Las partículas desgasificadas suelen volver a caer y el gas se captura en una bóveda de recogida de gases instalada en la parte superior del reactor.

Es decir, permanentemente tenemos un flujo ascendente y otro descendente de agregados bacterianos, aunque no hay una distribución homogénea de los mismos, ya que su concentración es tanto mayor cuando más próximos están a la base del reactor.

Figura 1.4. Sistema UASB



El tiempo de contacto del reactor UASB es de 4 a 12 horas, permitiendo una reducción aproximada del 75 al 85% en la DQO. La velocidad de flujo necesaria para mantener el fango en suspensión es de 0.6 a 0.9 m/h.

### 1.2.4 Tratamientos terciarios.

Cuando los efluentes de una planta de tratamiento de aguas residuales de tipo secundario no cumplen con ciertos niveles de calidad se hace entonces necesario un tratamiento terciario o avanzado. Los objetivos del tratamiento terciario son eliminar la carga orgánica

remanente de un tratamiento secundario, desinfectarla para eliminar microorganismos patógenos, eliminar color y olor indeseables, remover detergentes, fosfatos y nitratos residuales, que ocasionan espuma y eutrofización respectivamente.<sup>(7)</sup>

Esta depuración puede realizarse también por medio de lagunado. El fundamento de este sistema no es más que utilizar el poder depurador de las bacterias presentes en el agua residual, las cuales permiten eliminar la materia en suspensión o disuelta y aquellos compuestos biodegradables como es la materia nitrogenada y carbonada. La cloración también es parte del tratamiento terciario o avanzado que se emplea para lograr un agua más pura.

### **1.2.5 Tratamiento de los residuos obtenidos en la depuración de las aguas residuales.**

Las diferentes operaciones de depuración de un agua residual generan una serie de residuos que pueden clasificarse en dos grupos:<sup>(5)</sup>

- **Sólidos gruesos** que normalmente se obtienen en los pretratamientos y que, por lo general, o bien son incinerados o bien se depositan en vertederos.
- **Lodos**, que se generan tanto en los tratamientos primarios como en los secundarios.

Los lodos o fangos se presentan en forma líquida o semisólida y con un contenido de entre 0.25 y 12% (en peso) de sólidos, según el proceso del que procedan.

Los lodos se someterán a uno u otro tratamiento según sea su origen y su carga contaminante o tóxica. Estos tratamientos intentan reducir el volumen de estos fangos (mediante deshidratación) y contemplan la posibilidad de, o bien recuperar algún componente, o bien acondicionarlos para su reutilización (por ejemplo, en agricultura).

La acumulación de lodos o fangos genera tres problemas esenciales: <sup>(5)</sup>

- **Problema de espacio** (el fango ocupa espacio).
- **Problema medio-ambiental**, debido a que los fangos presentan un alto contenido en metales pesados, por lo que su acumulación en el suelo es conflictiva.  
La presencia de nitratos en los fangos puede originar problemas de contaminación en aguas subterráneas. Además los fangos contiene todo tipo de contaminantes orgánicos.
- **Problema higiénico-sanitario**, en el uso o manipulación de fangos que hayan sido sometidos a un tratamiento térmico a alta temperatura que asegure la eliminación de los organismos patógenos que puedan contener.

#### **1.2.5.1 Operaciones preliminares en el tratamiento de fangos.**

El tratamiento de los fangos es complejo, tanto por el hecho de contener gran parte de las sustancias responsables de la toxicidad del agua residual no tratada, como por contener materia orgánica. El fango producido en el tratamiento biológico contiene la materia orgánica presente en el agua residual en una forma diferente a la inicial, susceptible de descomponerse y llegar a ser tóxica.<sup>(5)</sup>

Antes de iniciarse el tratamiento de los fangos es necesario, en ocasiones, realizar una serie de operaciones preliminares para obtener un compuesto relativamente homogéneo y en cantidad constante. Las operaciones preliminares típicas son:

- El triturado del fango.
- El desarenado (cuando la separación de la arena se haya realizado en el sedimentador primario).
- El mezclado de los distintos fangos producidos a lo largo del proceso de depuración y almacenado, así se corrigen las variaciones en la producción de fango.

#### **1.2.5.2 Estabilización.**

Con la estabilización, el fango pierde sus características iniciales de putrescibilidad, se limitan los inconvenientes sanitarios que podrían derivarse de su uso (presencia de patógenos) y se eliminan los malos olores. Todos estos inconvenientes son debidos a la acción microbiana sobre la fracción orgánica o volátil del fango. Los mecanismos para solventar estos problemas y obtener productos estables e inertes son:<sup>(5)</sup>

- Reducción biológica de volátiles.
- Oxidación química de la materia volátil.
- Adición al fango de compuestos químicos que impidan la supervivencia de microorganismos.
- Aplicación de calor para desinfectar o esterilizar el fango.

Esta estabilización del fango se realiza mediante procedimientos de digestión anaerobia o aerobia (aireación prolongada en tanques iguales a los de lodos activos, que permite oxidar las materias volátiles y descomponer el fango), o mediante tratamientos químicos o térmicos como alternativa. De hecho se considera que existen dos categorías generales en los procesos de tratamiento de fangos:

- Sistemas que incluyen digestión biológica.
- Sistemas sin tratamiento biológico.

#### **1.2.5.3 Deshidratación.**

Finalmente, se somete a los fangos a algún proceso de deshidratación a fin de seguir reduciendo su contenido de humedad para obtener un producto de más fácil manejo y reducir los costos de transporte a su destino último; además, la deshidratación es necesaria antes del compostaje o de la incineración.<sup>(5)</sup>

Un sistema de deshidratación, lo constituyen los lechos de secado o eras de secado. Suelen ser tanques rectangulares contiguos, con un lecho poroso de arena y grava en su interior por el que se filtran las aguas que contienen los lodos ya digeridos o espesados. Su diseño permite que la eliminación de agua se realice tanto por el drenaje sobre lecho como por evaporación.<sup>(5)</sup>

#### 1.2.5.4 Sistemas de eliminación o reutilización del fango.

Los fangos de las depuradoras, una vez sometidos a todos o algunos de los tratamientos; se envían a un destino final que puede consistir en: <sup>(5)</sup>

- **Eliminación de fango.** Consiste en la incineración o bien en la deposición en vertederos especiales. En ambos casos, se produce una pérdida económica importante y es inevitable un fuerte impacto medio-ambiental.
- **Reutilización del fango.** Minimiza los negativos efectos económicos y ambientales de la eliminación. Los objetivos fundamentales de la reutilización son aprovechar los fangos como fuente de energía y aprovechar los componentes de los mismos.

El destino más frecuente de los fangos lo constituye su esparcimiento sobre o justamente por debajo de la superficie del suelo. Una vez sobre el terreno, la luz y los microorganismos del suelo terminan de destruir los patógenos y muchas sustancias orgánicas tóxicas que se encuentran en el fango.

Esta reutilización del fango, para que sea de utilidad agrícola, debe tener un efecto fertilizante y/o de enmienda y correctivo del suelo (facilitar el transporte de nutrientes; incrementar la retención de agua).

#### **Incineración del residuo.**

La incineración o reducción térmica de los fangos permite la total o parcial conversión de los sólidos orgánicos a productos finales oxidados, principalmente dióxido de carbono y agua, generándose un residuo, llamado cenizas, biológicamente inerte pero con una fuerte carga mineral de macro y micronutrientes que las convierte en un material aprovechable para el abonado. <sup>(5)</sup>

Esta incineración presenta diferentes inconvenientes como son una alta inversión inicial, fuertes costos de operación, requerir de personal especializado y emisión de gases tóxicos (dispersan a la atmósfera partículas de aerosol de metales pesados y de óxidos de azufre y nitrógeno).

#### **Vertido controlado.**

El vertido se debe realizar en vertederos especiales bajo un estricto control. Se lleva a cabo de forma compacta y en capas alternadas de fango y suelo sobre materias impermeables.

Entre los problemas que presenta el vertido controlado se deben mencionar el elevado costo de transporte, dificultad para encontrar vertederos adecuados y la contaminación del suelo y capas freáticas por lixiviación de elementos potencialmente tóxicos. <sup>(5)</sup>

#### **Reutilización agrícola de los fangos.**

La aplicación del fango sobre terrenos agrícolas puede ser directa, previa estabilización, o a través del **compostaje**. <sup>(5)</sup>

El **compostaje** es un proceso de degradación biológica, llevado a término por bacterias, actinomicetos y hongos, que estabilizan la materia orgánica. Consiste básicamente en esparcir sobre el terreno una delgada capa de material orgánico, dejándolo descomponerse y penetrar poco a poco en el suelo. Este material sufre una descomposición aerobia y asegura la cobertura y protección del suelo. <sup>(5)</sup>

Es aplicable sobre residuos sólidos urbanos, materiales orgánicos naturales fermentables y fangos deshidratados derivados de la depuración de aguas residuales. Generalmente, el compostaje se realiza en condiciones aerobias por espacio de 21-28 días, se alcanzan altas temperaturas (es un proceso exotérmico y pueden alcanzarse hasta 50-70°C), asegurándose la destrucción de patógenos, y se minimizan los problemas por malos olores. Los fangos debidamente compostados son seguros desde el punto de vista sanitario y son parecidos al humus del suelo al contener ácido húmico. <sup>(5)</sup>

Los fangos de depuradora y el compost presentan altos contenidos en materia orgánica, nitrógeno, fósforo y oligoelementos (como cobre, hierro y zinc), circunstancia por lo que se ha estudiado ampliamente su uso como abono organomineral y como enmienda orgánica del terreno.

Algunas de las propiedades que tiene el fango sobre el suelo son: <sup>(5)</sup>

- Los fangos actúan sobre las propiedades físicas del suelo, en especial aumentan la capacidad de retención de agua del mismo y favorecen la formación de agregados estructuralmente estables que elevan la porosidad y facilitan el aireamiento. Este efecto reestructurador y de mejora de las condiciones químicas y físicas del suelo reduce su erosionabilidad.
- Los fangos constituyen una base importante para el desarrollo de los microorganismos que actúan como reguladores de los ciclos biogeoquímicos del suelo.
- El dióxido de carbono formado en el proceso de mineralización de la materia orgánica del fango, proceso que transforma en disponible para las plantas los elementos nutritivos contenidos en el fango, facilita la disgregación y solubilización de los minerales del terreno. Además, el incremento del flujo de anhídrido carbónico desde el suelo a la atmósfera permite la intensificación de los procesos fotosintéticos.
- Los fangos aumentan la capacidad de intercambio catiónico de suelo, mejorando de esta manera su capacidad de reserva de nutrientes.

### **1.3 Tratamiento de aguas residuales mediante lagunas de estabilización**

#### **1.3.1 Concepto de laguna de estabilización.**

Una laguna de estabilización de aguas residuales es una estructura simple para embalsar agua, de poca profundidad de 1 a 4 m y con períodos de retención de magnitud considerable (de uno a cuarenta días).

Cuando las aguas residuales son descargadas en lagunas de estabilización, se realiza en las mismas, en forma espontánea, un proceso conocido con el nombre de autodepuración, o estabilización natural, en el que ocurren fenómenos de tipo físico, químico y biológico.

Este proceso se lleva a cabo en casi todas las aguas con alto contenido de materia orgánica putrescible o biodegradable.

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) de las aguas descargadas en una laguna de estabilización, y del efluente de las mismas, es el parámetro que más se ha utilizado para evaluar las condiciones de trabajo de las lagunas de estabilización y su comportamiento.

La estabilización de la materia orgánica se lleva a cabo a través de la acción de organismos aerobios cuando hay oxígeno disuelto en el agua, y de organismos anaerobios cuando no hay oxígeno disuelto en la misma.<sup>(1)</sup>

Los factores que intervienen en el proceso de las lagunas de estabilización son:

- Físicos: temperatura, insolación, infiltración y evaporación, precipitación pluvial y vientos.
- Químicos: demanda bioquímica de oxígeno, pH, nutrientes, contaminantes resistentes.
- Biológicos: algas y bacterias.

### **1.3.2 Objetivos de las lagunas de estabilización.**

Las lagunas de estabilización se construyen con los siguientes objetivos:<sup>(8)</sup>

- Protección epidemiológica, a través de la disminución de organismos patógenos presentes en las aguas residuales y dificultando la transmisión de los mismos.
- Protección ecológica, a través de la disminución de la carga orgánica (DBO) de las aguas residuales, lográndose de esta manera que el nivel de oxígeno disuelto en los cuerpos receptores se vea menos comprometido, con el consiguiente beneficio para su reuso.
- Reuso directo del agua servida tratada en la agricultura, así como en piscicultura, evitando los riesgos e inconvenientes del reuso de aguas servidas crudas.

### **1.3.3 Ventajas y desventajas.**

#### **1.3.3.1 Ventajas.**

- Presenta alta eficiencia
- Costo inicial bajo.
- Gastos de operación y mantenimiento bajos.
- Gran capacidad para recibir sobrecarga.
- Simplicidad de operación.
- No requiere equipo mecánico.



### 1.3.3.2 Desventajas.

- Requiere grandes extensiones.
- Puede ocasionar problemas de olores (generalmente las lagunas anaerobias).
- Puede producir vectores.
- En épocas de frío disminuye su eficiencia.
- Si el precio del terreno es alto puede salir costosa.

### 1.3.4 Clasificación.

#### 1.3.4.1 De acuerdo al proceso biológico desarrollado:

- **Lagunas aerobias:**

Predominan los procesos aerobios (presencia de oxígeno). Se basan en el aporte de oxígeno a partir del crecimiento de fotosintetizadores y permiten obtener efluentes de baja DBO soluble pero de alto contenido de algas, las que debieran ser cosechadas a fin de controlar los cuerpos receptores.

La profundidad debe ser tal que no se alcancen a producir regiones sin oxígeno, sobre todo teniendo presente que la turbiedad impide el paso de la luz solar; se suelen encontrar profundidades de 30 a 50 centímetros y tiempos de retención hidráulicos (es decir, volumen de la laguna dividido por caudal medio tratado) de 4 a 6 días de modo que el terreno requerido para esta tecnología puede ser intolerablemente grande. Permiten reducciones del 80 al 95% de la DBO<sub>5</sub>. La tasa de carga de este tipo de lagunas cae en el rango de 85 a 170 Kg. de DBO<sub>5</sub>/ha.día.<sup>(9)</sup>

- **Lagunas anaerobias:**

Predominan los procesos de fermentación anaerobia. “las bacterias anaerobias no requieren oxígeno para reducir la materia orgánica, el proceso es más sensible a condiciones ambientales, produce olores desagradables, es largo y la estabilización no es total”.<sup>(4)</sup>

Las lagunas anaerobias suelen recibir cargas de 225 a 600 Kg. de DBO<sub>5</sub>/ha.día con tiempo de retención hidráulico de 20 a 50 días. Rendimientos en la reducción de la DBO<sub>5</sub> del 50-85%. La profundidad puede ser entre 2.5 y 5 m.<sup>(5)</sup>

- **Lagunas facultativas:**

Laguna o estanque de tratamiento con una sección superior aerobia y una inferior anaerobia de modo tal que los procesos biológicos aerobios y anaerobios se produzcan en forma simultánea.

En el estrato superior de una laguna facultativa primaria existe una simbiosis entre algas y bacterias, en presencia de oxígeno; en los estratos inferiores se produce una biodegradación anaerobia de los sólidos sedimentables.

La carga aceptable para estas lagunas cae entre 85 y 170 Kg. DBO<sub>5</sub>/ha.día. Se recomienda eficiencias entre el 70 y 90%. El tiempo de retención hidráulico cae en el rango de 5 a 30 días y la profundidad de operación debe estar entre 1.2 a 2.5 metros; por otra parte, se debe garantizar que el fluido utilice todo el volumen de la laguna, evitando corto circuitos y/o regiones muertas.<sup>(9)</sup>

- **Lagunas de aeración:**

Este tipo de lagunas se desarrolló a partir de los estanques de estabilización facultativos en los que solo se tuvo que instalar aereadores de superficie para eliminar los olores que se producían al estar sometidos a sobrecargas orgánicas.<sup>(5)</sup>

#### **1.3.4.2 De acuerdo al lugar que ocupan; con relación a otros procesos.**

- Lagunas primarias: reciben aguas residuales crudas.
- Lagunas secundarias: reciben efluentes de otros procesos de tratamiento.
- Lagunas de acabado: lagunas de mayor grado que las secundarias. También llamadas estanques de estabilización de baja carga, son lagunas terciarias diseñadas para mejorar la calidad de los efluentes de tratamientos secundarios y la nitrificación estacional. Las cargas aplicadas al sistema deben de ser bajas para poder mantener las condiciones aerobias.

#### **1.3.4.3 De acuerdo a la disposición de las unidades.**

- Lagunas en serie: permite una mejora importante en la calidad bacteriológica del efluente.
- Lagunas en paralelo: no mejora la calidad del efluente, pero en cambio, ofrece muchas ventajas desde el punto de vista constructivo y operativo. En contar con por lo menos un sistema en paralelo permite sobrecargar una mientras se lleva a cabo la limpieza o mantenimiento de la otra.

#### **1.3.5 Funcionamiento de las lagunas**

El funcionamiento de las lagunas está gobernado por diferentes factores, entre los cuales tenemos:

- Penetración de la luz solar en el agua, necesaria para el desarrollo de condiciones aerobias.<sup>(10)</sup>
- La profundidad del estanque: los muy profundos limitan el alcance de los rayos solares sólo a las capas superiores y los estanques poco profundos son favorables a la aparición de diversos tipos de plantas que podrían limitar el paso de los rayos.
- Precipitación y evaporación en la zona: que podrían alterar el funcionamiento debido a las variaciones de volumen.
- Permeabilidad del suelo: por la cantidad de caudal que se filtra en el fondo y costados de la laguna.

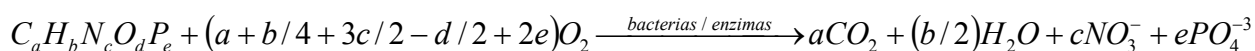
- Vientos: mejoran el funcionamiento cuando son moderados, por la acción mezcladora que producen.
- Naturaleza y fructificación de las algas, ya que consumen anhídrido carbónico y en condiciones climáticas adecuadas liberan oxígeno durante el día.<sup>(4)</sup>

### 1.3.5.1 Mecanismos de funcionamiento

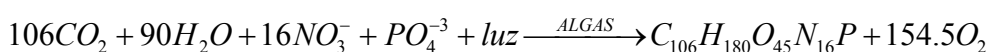
Gloyna,<sup>(8)</sup> ha esquematizado el funcionamiento de las lagunas en los procesos:

- **Proceso Aerobio:**

Este proceso se caracteriza porque la descomposición de la materia orgánica se lleva a cabo en presencia de oxígeno, produciéndose compuestos inorgánicos que sirven de nutrientes a las algas, las cuales a su vez producen más oxígeno que facilita la actividad de las bacterias aerobias. El proceso de desdoblamiento de la materia orgánica se lleva a cabo con intervención de enzimas producidas por las bacterias en sus procesos vitales:

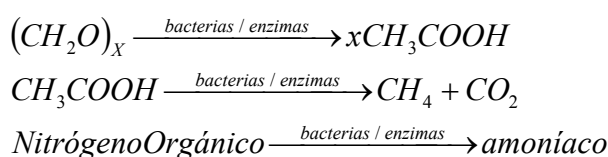


A su vez, las algas logran sintetizar materia orgánica que se incorpora a su propio protoplasma. Este proceso que se lleva a cabo en presencia de la luz solar recibe el nombre de fotosíntesis. En el mismo se desprende oxígeno (que es aprovechado por las bacterias aerobias para satisfacer la DBO) tal como se muestra en la siguiente reacción:



- **Proceso Anaerobio:**

El tratamiento anaerobio supone la descomposición de la materia orgánica y/o inorgánica en ausencia de oxígeno molecular. Las reacciones anaerobias son más lentas y los productos de las mismas originan malos olores.



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

El primer grupo hidroliza y fermenta compuestos orgánicos complejos a ácidos simples, de los cuales los más corrientes son el ácido acético y el ácido propiónico. Este grupo de microorganismos se compone de bacterias facultativas y anaerobias colectivamente denominadas bacterias formadoras de ácidos.

El segundo grupo convierte los ácidos orgánicos formados por el primer grupo en gas metano y anhídrido carbónico, las bacterias responsables de esta conversión son anaerobias estrictas y se les conoce como bacterias formadoras de metano. Las bacterias más

importantes de este grupo tienen tasas de crecimiento muy lentas y por ello su metabolismo se considera como limitante del tratamiento anaerobio de un residuo orgánico.

En esta segunda fase tiene realmente lugar la estabilización del residuo, al convertirse los ácidos orgánicos en metano y anhídrido carbónico; el gas metano así obtenido es sumamente insoluble y su separación de la solución representa la estabilización del residuo.<sup>(4)</sup>

En el proceso anaerobio las bacterias suelen aprovechar parte de los nutrientes inorgánicos en la fabricación de su propio protoplasma celular, cosa que también sucede en el proceso aerobio. Sin embargo, llama la atención el hecho de que en ambos casos el resultado final es una disminución notable de bacterias, lo cual ocurre como consecuencia del agotamiento de los nutrientes y de otros fenómenos aún no muy claramente comprendidos en los que juegan un papel muy importante, el período de retención, la temperatura, la luz solar, etc.<sup>(4)</sup>

### 1.3.6 Criterios de diseño

#### 1.3.6.1 Definiciones generales

Entre los términos a utilizar conviene definir:

- Período de retención hidráulico.

Es el tiempo en el cual un volumen de agua, que ingresa a la laguna, permanece en la misma hasta ser evacuado después de su tratamiento. Se formula:

$$R = \frac{V}{Q} \quad (1.1)$$

donde:

- R : Período de retención en días.
- V : Volumen de la laguna en m<sup>3</sup>.
- Q : Caudal afluente en m<sup>3</sup>/día.

- Factor de corrección hidráulica (HCF).

En la mayoría de las lagunas de estabilización, el comportamiento hidráulico es regido por las leyes de flujo laminar. Bajo este régimen de flujo, las capas superiores de agua de la laguna (hacia las cuales son atraídas las algas durante el día) se mueven a una velocidad igual a 2/3 la velocidad promedio. Por consiguiente, el tiempo de retención de la biomasa que está en esta zona de la laguna tiende a ser 2/3(Volumen de laguna/Q<sub>afluente</sub>).<sup>(13)</sup>

Debido al efecto de la posición relativa de las estructuras de entrada y salida, y el diseño de las mismas, el “factor de corrección hidráulica” (HCF) tiene en la práctica un valor entre 0.3 y 0.8. Tomando en consideración este factor, el tiempo de retención real será:<sup>(14)</sup>

$$\theta = R \times HCF \quad (1.2)$$

- Carga orgánica.

Normalmente estimada en función de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), que es el oxígeno consumido por los microorganismos para oxidar el sustrato orgánico biodegradable de un agua residual.

- Mezcla completa, flujo tipo pistón y flujo disperso.

Al estudiar la cinética del proceso que se lleva a cabo en una laguna de estabilización, caben varias hipótesis. Una de ellas, la más empleada, es la de suponer que hay una **mezcla completa** del agua servida, que acaba de ingresar en la laguna, con el resto del agua de la laguna. Otra hipótesis supone **flujo tipo pistón**, es decir, que el agua servida recién ingresada fluye como “un pistón en un cilindro”, y se va estabilizando en forma gradual. El fenómeno de flujo a pistón se ha podido apreciar en lagunas alargadas, en las que la relación largo/ancho es superior a 3.

Sin embargo, estudios realizados demuestran que no hay lagunas que trabajan totalmente bajo el régimen de mezcla completa, o totalmente bajo el régimen de flujo a pistón. En realidad, las lagunas trabajan bajo un régimen de **flujo disperso**, en el que se presentan simultáneamente ambos tipos de flujo. El problema se complica aún más por la presencia de las zonas muertas (donde no ocurre flujo alguno) y los cortocircuitos.<sup>(8)</sup>

### 1.3.6.2 Formulaciones para el diseño de lagunas.

**Para remoción de DBO o carga bacterial:<sup>(11)</sup>**

Para el modelo que supone mezcla completa:

$$\frac{C}{C_o} \text{ ó } \frac{N}{N_o} = \frac{1}{K\theta + 1} \quad (1.3)$$

Para el modelo que supone flujo a pistón:

$$\frac{C}{C_o} \text{ ó } \frac{N}{N_o} = e^{-K\theta} \quad (1.4)$$

En donde:

- C : DBO<sub>5</sub> del efluente.
- C<sub>o</sub> : DBO<sub>5</sub> del afluente.
- N : Concentración final de coliformes fecales (NMP/100ml).
- N<sub>o</sub> : Concentración inicial de coliformes fecales (NMP/100ml).
- K : Constante de remoción que puede ser para DBO (K) o para coliformes fecales (K<sub>b</sub>) en día<sup>-1</sup>.
- θ : Período de retención real en días.

Para el modelo que supone flujo disperso:

$$\frac{C}{C_o} \dot{o} \frac{N}{N_o} = \frac{4ae^{0.5d}}{(1+a)^2 e^{a/2d} - (1-a)^2 e^{-a/2d}} \quad (1.5)$$

$$a = \sqrt{(1 + 4K\theta d)}$$

en donde “d” es el factor de dispersión y se calcula:

$$d = \frac{X}{-0.26118 + 0.25392X + 1.01368X^2} \quad (1.6)$$

En la ecuación anterior, X es la relación largo/ancho de la laguna. Para lagunas cuadradas (largo/ancho igual a 1) el factor de dispersión es igual a 1. En lagunas con relación largo/ancho igual a 2, el factor de dispersión es 0.5.

Para facilitar el cálculo y, a manera de aproximación, el segundo término en el denominador de la ecuación 1.4 es reducido, por lo que puede ser pasado por alto, en cuyo caso la fórmula es:

$$\frac{C}{C_o} \dot{o} \frac{N}{N_o} = \frac{4ae^{(1-a)/2d}}{(1+a)^2} \quad (1.7)$$

Para remoción de casi todos los parásitos se requiere una laguna primaria con 10 días de retención y para asegurar una remoción total se requiere una serie primaria y secundaria con una retención total de 20 días.<sup>(12)</sup>

#### **Limite de carga según proceso predominante: facultativo o anaerobio.**

Este límite para 20°C es una carga de 357.4 Kg DBO/(ha.día). Si se tiene en cuenta que el NH<sub>3</sub>-N sólo puede incrementarse a través de procesos anaerobios, dicha carga establece el umbral entre las predominancias aerobia y anaerobia. El limite de carga establecida para otras condiciones de temperatura estaría dado por la siguiente ecuación:

$$La_t = 357.4 \times 1.085^{(T-20)} \quad (1.8)$$

en donde La<sub>t</sub> es la máxima carga de DBO aplicable a una laguna facultativa, a la temperatura T del agua (°C).<sup>(12)</sup>

