



CAPÍTULO III.

PROCESO DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

3.1. Introducción

Las tecnologías que emplean microorganismos para la depuración de aguas residuales han sido las tecnologías más empleadas debido al bajo costo frente a los métodos físicos y químicos. Las plantas de tratamiento de aguas pueden estar en diferentes condiciones climáticas- desde los trópicos, hasta las regiones polares, a nivel del mar (plantas depuradoras en barcos) hasta elevadas alturas (en hoteles en las montañas). Pueden así mismo servir para uso familiar y para grandes ciudades. Las plantas depuradoras de agua equipadas con un sistema basado en procesos biológicos son capaces de cumplir con los más exigentes criterios.

El desarrollo de tecnologías basadas en microorganismos ha proporcionado excelentes procesos para la degradación de compuestos fácilmente biodegradables, ya sea a condiciones aerobias o anaerobias. Estos procesos son menos costosos porque las reacciones de degradación, medidas por la actividad biocatalítica de los microorganismos, se producen a velocidades rápidas a temperatura ambiente.

Sin embargo, muchos diseños clásicos para el tratamiento de aguas residuales no consiguen degradar compuestos químicos de aparición reciente, inventados durante el siglo XX y que ahora aparecen en las aguas residuales y domésticas. Es así que se deben desarrollar nuevas tecnologías o mejorar las ya existentes a fin de controlar las descargas contaminantes. Dichos diseños deberán además ser capaces de utilizar procesos biológicos basados en la actividad de los microorganismos.

Este capítulo proporciona un panorama general del proceso de tratamiento de aguas residuales a gran escala y se discuten las limitaciones de los procesos respecto a la eliminación de compuestos no convencionales como lo son los compuestos orgánicos y los metales pesados.



3.2. Partes del proceso de tratamiento de agua residual

El contenido de las aguas residuales municipales es principalmente orgánico, así mismo en muchas industrias como la química o la farmacéutica, las aguas residuales se caracterizan por presentar cargas orgánicas altas. Esto quiere decir que el proceso de tratamiento estará enfocado a remover el material orgánico. En una planta típica de tratamiento, el agua residual se pasa por una serie de procesos físicos, químicos y biológicos cada uno con una tasa de eliminación específica. Estos pasos son:

Pre-tratamiento	Físico y/o Químico
Tratamiento primario	Físico
Tratamiento secundario	Biológico
Tratamiento terciario	Físico y/o Químico y/o Biológico

3.2.1. Pre- tratamiento

De acuerdo a Tchobanoglous, pre-tratamiento es el proceso o procesos que preparan el agua residual para un proceso de tratamiento secundario. En aguas residuales municipales implica la remoción de partículas flotantes, arena y grasas, ya que contaminantes podrían inhibir los procesos biológicos y dañar el equipo. En algunas ocasiones el pH del efluente puede ser muy ácido o básico por lo que será necesaria la corrección del mismo para permitir la degradación biológica, agregando ácido sulfúrico o cal. Así mismo las descargas varían, no son constantes, por lo que deben almacenarse en un tanque de homogeneización para evitar malfuncionamiento. Si el agua residual no contiene nutrientes, estos deberán ser agregados en la etapa de pre-tratamiento. Normalmente esta etapa se rige por procesos físicos, por ejemplo balance de flujo, remoción de partículas por medio de rejillas, desarenadores, etc.



Rejillas. El objetivo de las rejillas es remover material flotante grande como botellas de plástico, bolsas, con el fin de proteger el equipo de bombeo. Existen cuatro tipos de rejillas

- Gruesas con aperturas mayores a 6 mm que remueven materiales largos
- Finas con aperturas en un rango de 1.5 a 6 mm, usadas usualmente como sustitutos para la clarificación primaria
- Rejillas muy finas con aperturas de 0.2 a 1.5 mm, que reducen los sólidos sedimentables en clarificadores primarios.
- Microrejillas con un tamaño de apertura en un rango de 0.001 a 0.3 mm, se usan para limpiar el efluente como paso final

Canales de arena. El arena y la grava encontrada en el agua residual proviene del escurrimiento de carreteras y el pavimento, normalmente no existe arena en los procesos industriales, pero forma parte del efluente por la combinación con agua de lluvia. La arena se remueve porque llega a desgastar el equipo y al sedimentarse en los tanques biológicos reduce el espacio para el proceso. Los dos tipos de desarenadores más comunes son:

- cámara de flujo aireado helicoidal
- canal de flujo horizontal

Flotación. La sedimentación es el proceso que separa sólidos de líquidos mediante la acción de la gravedad. Flotación es el proceso de separar partículas “sólidas” de una fase líquida. Los sólidos presentes en aguas municipales son grasas y aceites, sin embargo en muchas plantas no se encuentran en gran cantidad por lo que no se incluye dentro del proceso una etapa de flotación.

El proceso de separación involucra introducir burbujas de aire desde el fondo del tanque de flotación, estas burbujas se adhieren a las partículas de materia y sus fuerzas combinadas ayudan a las partículas a ascender a la superficie en donde



pueden ser removidas por medio de desnatadores. El proceso de flotación se utiliza cuando la velocidad de sedimentación de las partículas es demasiado lenta o no logran sedimentarse en los tanques convencionales. Algunas de estas partículas pueden precipitar con ayuda de la adición de algún coagulante. Un sistema de flotación incluye:

- (DAF) flotación por aire disuelto
- Electroflotación
- Flotación al vacío

Homogeneización. Para obtener un flujo de entrada que pueda manipularse sin un constante control, se requiere de homogeneización. Para ello se necesitarán uno o más de los siguientes puntos:

- Homogeneización de flujo
- Homogeneización de materia orgánica
- Balance de nutrientes
- Balance de pH (neutralización o corrección de pH)

El balance de flujo es común en industrias que operan 5 días a la semana. Así el flujo de los 7 días es balanceado o distribuido de manera que al entrar a la planta el flujo sea igual siempre. De manera similar la concentración de materia orgánica o contaminantes varía constantemente, si la planta fuera alimentada con estas condiciones de flujo causaría una crisis en el sistema. Es así que las cargas altas de materia orgánica y de compuestos tóxicos o contaminantes son retenidas en tanques y homogeneizadas antes de alimentar el proceso. Esta etapa es idónea para corregir ciertas deficiencias o para aplicar soluciones ácidas o básicas para ajustar el pH, para el proceso de lodos activados, este debe estar en un rango de 6.5 -8.5.



El proceso de homogeneización y neutralización se lleva a cabo después del proceso de tamizado y separación de arenas y antes de la sedimentación primaria.

3.2.2. Tratamiento Primario

Al tratamiento primario también se le conoce como clarificación o sedimentación. En esta operación el agua residual se deja reposar durante un periodo de tiempo (aprox. 2 horas) de manera que se produzca un flujo de líquido clarificado, y otro flujo conteniendo lodos (llamados primarios). El objetivo es producir un efluente que tenga la calidad necesaria para la siguiente etapa de tratamiento y retirar los sólidos contenidos que pueden ser tratados o mandados a disposición con mayor facilidad. Los beneficios del tratamiento primario incluyen:

- Reducción de sólidos suspendidos
- Reducción del DBO₅
- Reducción en la cantidad de lodos activados
- Remoción de material flotante
- Homogenización parcial de flujo y concentración de materia orgánica

El tratamiento primario está conformado de una sedimentación, con desnatadores en la superficie y un nivel de recolección de cama de lodos. La sedimentación se lleva a cabo en un tanque, que puede ser circular (más común), rectangular o cuadrado, el piso puede ser plano o en forma de tolva. El agua residual entra al tanque usualmente por el centro, a través de una caja de difusión, y el flujo clarificado sale por el perímetro del tanque.

Existen métodos químicos para favorecer la sedimentación primaria, esto se logra agregando coagulantes (ya sean sales, alúmina, cal, polímeros) al efluente antes de la sedimentación, esto favorece la formación de flóculos que precipitan y se logra remover



materia fina suspendida fácilmente. A medida que las tasas de descarga del clarificado aumenta, la tasa de remoción disminuye, mediante el uso de coagulantes esta tasa se mantiene constante en un rango de 20 -80 m³/m²/ día. La desventaja de estos sistemas radica en el aumento de lodos producidos, que además poseen características químicas muy diferentes a las de los lodos biológicos obtenidos de procesos primarios.

La cantidad de lodo producido durante los tratamientos primarios dependerá del flujo del proceso, de los sólidos suspendidos totales y de la eficiencia de remoción de los mismos. Esta cantidad puede ser determinada fácilmente mediante la siguiente fórmula:

$$S_m = Q \times TSS \times E \text{ (kg/día)}$$

Donde:

S_m = cantidad de lodos, kg/día

Q = flujo, m³/día

TSS = sólidos suspendidos totales, mg/L

E = eficiencia de remoción

En el tratamiento primario se remueve entre un 50% - 60% de los sólidos suspendidos y de un 30 -40 % del DBO total. Los lodos removidos de este proceso contienen materia orgánica (que puede ser degradada con gran facilidad) y materia inorgánica como arena, sílice, etc. El 5% son sólidos, mientras que el 95% restante es agua.



3.2.3. *Tratamiento secundario*

Los contaminantes de las aguas residuales pueden describirse con los siguientes parámetros:

- Sólidos totales – suspendidos (40%), disueltos (50%), sedimentables (10%).
Orgánicos (50%), inorgánicos (50%).
- Demanda Bioquímica de oxígeno
- Demanda química de oxígeno
- Nutrientes – nitrógeno y fósforo

Cerca del 65% de los sólidos removidos (sedimentables) son orgánicos y el remanente es inorgánico.

El principal objetivo del tratamiento secundario es reducir el valor del DBO_5 , de manera que la materia orgánica contenida sea biodegradada a productos no contaminantes.

Cuando una fuente de materia orgánica es administrada a un conjunto de microorganismos heterotróficos, estos se encargarán de metabolizar los compuestos orgánicos a través de la pared celular rápidamente, mientras que aquellos compuestos que no sean de fácil degradación serán adsorbidos y almacenados en la célula, con el paso del tiempo enzimas extracelulares se encargarán de romper los enlaces, y finalmente llegarán a la pared celular en donde serán metabolizados.

Parte de la materia orgánica se irá a crecimiento bacteriano es decir, nuevas células, mientras que otro porcentaje se pierde como calor, en los procesos aeróbicos el oxígeno suministrado es proporcional al material orgánico degradado. Al mismo tiempo existe una pérdida neta de biomasa activa, llamada fase endógena, en donde algunos de los microorganismos utilizan su propio material celular y células muertas como fuente de alimento.



Esta degradación endógena es continua y relativamente constante perdiéndose de un 10-20% por día.

El líquido en el efluente final deberá estar bien estabilizado de manera que no provea alimento para las bacterias presentes en el cuerpo receptor. Para lograr esto existen varios arreglos:

- Crecimiento suspendido
- Crecimiento en lecho fijo
- Arreglo de ambos crecimientos, suspendido y fijo.

Los sistemas de crecimiento suspendido están definidos como aquellos que logran reducir la cantidad de materia orgánica por medio de altas concentraciones de microorganismos a través de una recirculación de sólidos biológicos. Los mecanismos para remover la materia orgánica incluyen:

- Biodegradación
- Aireación
- Adsorción

La adsorción de material no biodegradable no ocurre con mucha frecuencia, pero ciertos compuestos orgánicos, como los pesticidas, si logran adsorberse. Los metales pesados por otro lado se adsorben y pueden bioacumularse en la biomasa, dando como resultado lodos conteniendo metales pesados.

Los sistemas de crecimiento fijo están definidos como aquellos que proporcionan a los microorganismos un soporte sobre el cual pueden adherirse y formar una película biológica. En todos estos sistemas, mientras la masa biológica se va espesando el transporte de los nutrientes a los microorganismos interiores se va haciendo más difícil lo cual conducirá al desprendimiento de la biomasa sobre una superficie determinada. En estos sistemas el fenómeno de la adsorción se presenta del mismo modo que en los sistemas de crecimiento suspendido.



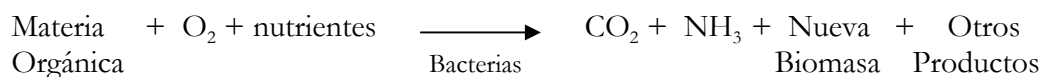
Las características generales de los biorreactores aerobios y anaerobios empleados en las instalaciones convencionales de tratamiento de aguas residuales se discuten por separado a continuación. Estos reactores utilizan una población mezclada de microorganismos que se desarrollan a partir de los microorganismos presentes en el influente y de las condiciones operativas del reactor

3.2.4. *Bio -reactores aerobios*

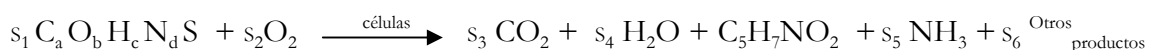
Mediante un proceso biológico viable ya sea aerobio, anaerobio u otro es posible eliminar la materia orgánica presente en un influente, sin embargo, los procesos aerobios son los más comúnmente usados debido a que pueden llegar a ser hasta 10 veces más rápidos que los procesos anaerobios lo que minimiza los costos derivados de construcción y mantenimiento ya que son relativamente más pequeños y pueden permanecer abiertos a la atmósfera.

La principal desventaja de los procesos aerobios es que gran parte de la materia orgánica se irá a crecimiento biológico (masa celular producida por unidad de materia orgánica biodegradable) esta tasa de crecimiento es relativamente alta, más o menos 4 veces mayor que el producido por los organismos anaerobios. La materia celular en exceso y otros materiales insolubles deberán ser evacuados como residuos sólidos.

La ecuación de la respiración celular y síntesis usando materia orgánica como sustrato en el proceso es la siguiente:



La estequiometría de un proceso microbiológico aerobio es:



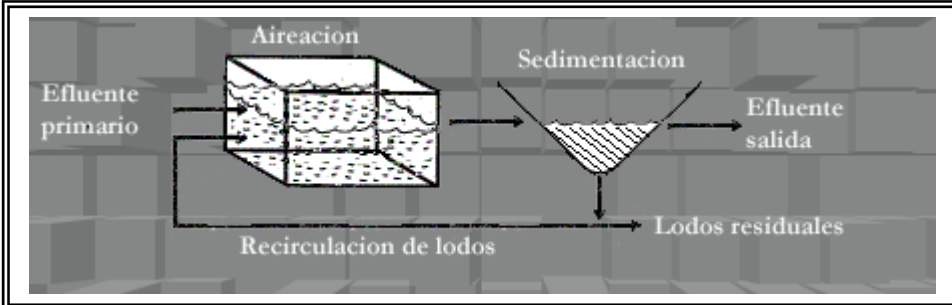
donde $C_a O_b H_c N_d S$ es la composición elemental del influente; a,b,c y d se determinan



según la composición específica del agua residual; y $C_5H_7NO_2$ es la composición media de una célula (Metcalf y Eddy, Inc.,1991).

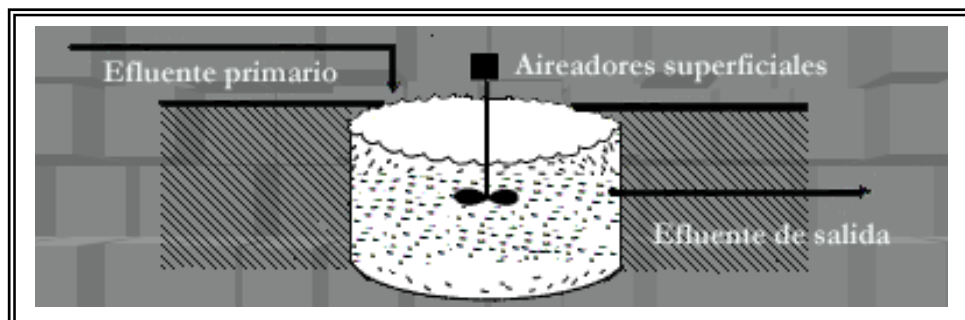
Existen varios diseños de reactores aerobios y se resumen en la Tabla 1.1. El más común de estos diseños de tratamiento secundario es el de los lodos activados.

TABLA 3.1 Descripción de los reactores aerobios

Nombre del reactor	Descripción	Esquema
Procesos con biomasa en suspensión		
Lodos activados		

Reactor denominado tanque de aireación, un tanque de sedimentación, y dos líneas para los lodos, una línea de recirculación de sólidos del sedimentador al tanque de aireación, y una línea de desecho. (lodos activados). Aireación forzada. Reducción de la DBO del 85-95%

Lagunas, Estanques de Estabilización



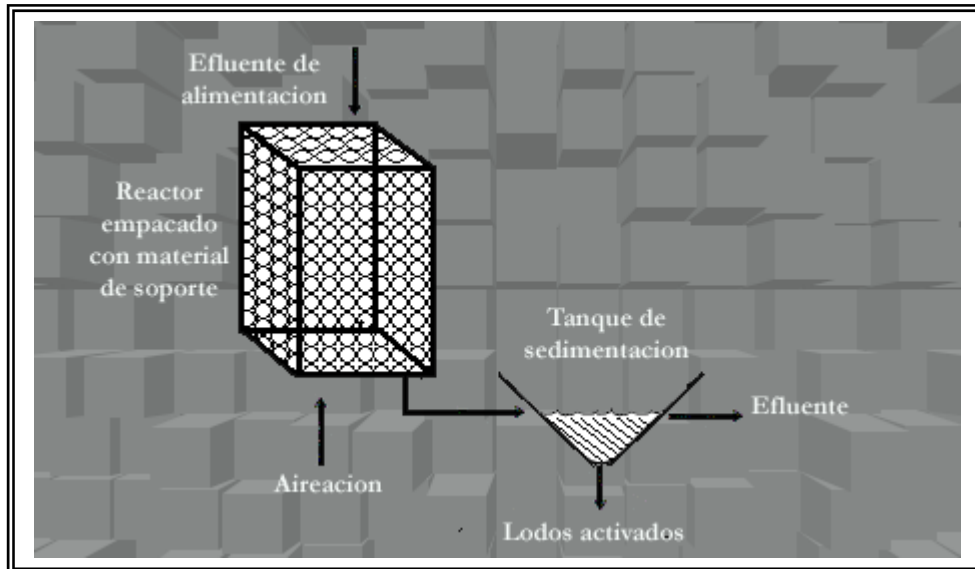
Estanque excavado en el suelo, abierto a la atmósfera. Dependiendo del sistema de aireación y de mezclado puede trabajar aeróbica y anaeróbicamente (facultativo).

Aireación pasiva o superficial. Permite reducción de la DBO y estabilización de lodos en un mismo depósito. Aceptan cargas con baja concentración de materia orgánica como aquel proveniente del tratamiento secundario. Reducción de la DBO del 80-95%

TABLA 1.1 Descripción de los reactores aerobios (*continuación*)

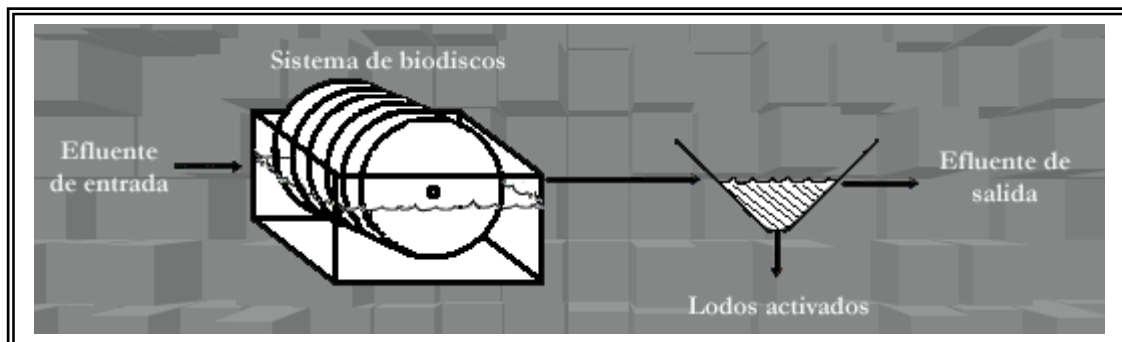
Nombre del reactor	Descripción	Esquema
--------------------	-------------	---------

Procesos con biomasa
en lecho fijo
Lechos bacterianos



Torres empacadas con un medio de soporte que apoya el crecimiento celular; el flujo se distribuye sobre la parte superior del medio y después se filtra entre el medio donde hace contacto con la biomasa; aireación pasiva que fluye desde abajo y arriba. El medio puede ser grava o estructuras huecas de diversos materiales (plástico, porcelana, etc.) con un área superficial alta.
Reducción de la DBO lecho rocoso 80-90%
Reducción de la DBO lecho plástico 65-90%

Biodiscos



Discos duros donde se adhiere la biomasa, giran sobre un eje horizontal que contacta de forma alterna con el flujo de los residuos abajo y el aire arriba. Se utilizan múltiples discos por reactor funcionan en serie y paralelamente.

Reducción de la DBO lecho rocoso 60-95%



3.2.5. *Bio-reactores anaerobios*

Los arreglos con procesos aerobios son generalmente más usados debido a que son más económicos, sin embargo cuando existen necesidades especiales de tratamiento por presencia de ciertos elementos como en el caso de los residuos peligrosos, los procesos anaerobios presentan ventajas importantes sobre los aerobios.

Los tres procesos microbiológicos no aerobios utilizados con más frecuencia son:

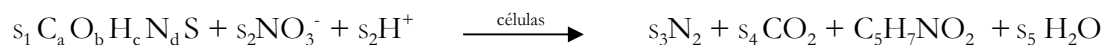
(1) Anaerobio (metanogénesis), (2) anóxico (reducción de nitratos) y (3) reducción de sulfatos.

La reacción metanogénica típica no ajustada es:



A menudo el biogás producido se recolecta y se quema para brindar calentamiento al reactor lo cual acelera el proceso biológico, es decir, la reacción.

En flujos en los cuales existen niveles altos de amoníaco se emplea un proceso anóxico posterior al tratamiento aerobio para reducir los nitratos resultantes de la respiración celular a gas nitrógeno. La reacción no ajustada es



En flujos que contienen altos niveles de sulfatos y compuestos orgánicos, se pueden reducir los sulfatos mediante la oxidación del efluente orgánico. La reacción no ajustada es





3.3. Limitaciones de los procesos biológicos

La biodegradación es el mecanismo dominante en el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales y el éxito de estos procesos depende del destino final de los compuestos contaminantes o peligrosos al final del proceso. Los principales destinos para los compuestos peligrosos son los siguientes:

1. *Biodegradación.* Como ya se menciona anteriormente este es el mecanismo principal o dominante, en él el compuesto se destruye al menos parcialmente, pero dependerá del tipo de microorganismos presentes, los aerobios no son muy eficaces mientras que los anaerobios presentan tasas de degradación altas ante compuestos peligrosos o refractarios.
2. *Evaporación.* Los compuestos volátiles pueden evaporarse mientras están en el sedimentador primario, en el bio-reactor, o en el sedimentador secundario, debido a la aireación o a la ventilación del biorreactor.
3. *Adsorción a sólidos y precipitación.* Los compuestos orgánicos que se separan del agua y pasan a los sólidos en el bio-reactor, como por ejemplo los microorganismos, al final saldrán de la instalación en la evacuación de los lodos. En los lodos residuales de los procesos de tratamiento biológico con frecuencia se separan y precipitan metales pesados.
4. *Escape.* Los compuestos que no se biodegradan completamente, volatilizan, o se adsorben a los sólidos saldrán del bio-reactor en el flujo del efluente líquido descargándose en aguas superficiales o marinas.