



USAID
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS
UNIDOS DE AMÉRICA



Guía de referencia de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales utilizados en Centro América



CRÉDITOS:

Editor: Arq. Julián Antonio Monge Vásquez

Fotografías y colaboración: Stewart Oakley, Louis Salguero y Bruce Henry

ACERCA DE LOS AUTORES

Ing. Bruce Henry

Ingeniero Ambiental

Consultor para Tratamiento de Aguas Residuales

Y Jubilado de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

Lithonia, Georgia, EE.UU.

Dr. Stewart Oakley

Profesor de Ingeniería Ambiental

Departamento de Ingeniería Civil

Universidad Estatal de California, Chico Chico,

California, EE.UU.

Ing. Louis Salguero

Ingeniero Ambiental

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA).

Athens, Georgia, EE.UU.

Msc. Ing. Pedro Saravia

Profesor y Director de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos

Universidad de San Carlos de Guatemala

Ciudad de Guatemala, Guatemala

Arq. Julián Monge Vásquez

Consultor para Tratamiento de Aguas Residuales

San Salvador, El Salvador

Esta publicación y el trabajo descrito en ella fueron financiados por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), a través de un convenio interinstitucional entre esta agencia y la Agencia de los Estados Unidos para la Protección Ambiental (USEPA), en apoyo a la agenda de la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD), y en el contexto de los compromisos ambientales del Tratado de Libre Comercio Centroamérica - República Dominicana - Estados Unidos (CAFTA-DR).

Las opiniones e ideas expresadas aquí son las de los autores y no reflejan necesariamente las de USAID, USEPA o CCAD, ni representan sus políticas oficiales.

La mención de marcas registradas o productos comerciales no significa la aprobación ni recomendación por parte de USAID, USEPA o CCAD.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| Introducción..... | 1 |
| Tabla 1: Etapas de tratamiento en Plantas o Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales utilizadas en Centroamérica..... | 2 |
| 1.0 Etapas del tratamiento en Plantas o Sistemas de Tratamiento utilizados en Centroamérica | 3 |
| 1.1 Pretratamiento..... | 3 |
| 1.2 Tratamiento Primario..... | 3 |
| 1.3 Tratamiento Secundario..... | 3 |
| 1.4 Tratamiento de Lodos..... | 3 |
| 2.0 Plantas o Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales utilizadas en Centroamérica..... | 4 |
| 2.1 Sistema de Tratamiento de aguas residuales con Filtro Percolador..... | 4 |
| 2.1.1 Pretratamiento | 4 |
| 2.1.1.1 Cámara de rejas o Criba..... | 5 |
| 2.1.1.2 Canal desarenador doble con dispositivos de control de velocidad de flujo..... | 5 |
| 2.1.1.3 Aforador o medidor de caudales Parshall o Vertedero en “V” | 6 |
| 2.1.1.4 Cámara de retención de grasas o Trampa de grasas..... | 6 |
| 2.1.2 Sedimentador Primario tipo Dortmund..... | 6 |
| 2.1.3 Filtro Biológico o Percolador..... | 6 |
| 2.1.4 Sedimentador Secundario Tipo Dortmund..... | 7 |
| 2.1.5 Digestor de Lodos..... | 7 |
| 2.1.6 Lechos o Patios de secado..... | 7 |
| 2.2 Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales con Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente (RAFA)..... | 7 |
| 2.2.1 Pretratamiento | 8 |
| 2.2.2 Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente..... | 8 |
| 2.2.3 Filtro Biológico o Percolador..... | 9 |
| 2.2.4 Sedimentador Secundario Tipo Dortmund..... | 9 |
| 2.2.5 Digestor de Lodos..... | 9 |
| 2.2.6 Lechos o Patios de secado..... | 9 |
| 2.3 Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales con Lodos Activados Aireación Prolongada.... | 9 |
| 2.3.1 Pretratamiento | 10 |
| 2.3.2 Tanque o Cubeta de Aireación..... | 10 |
| 2.3.3 Sedimentador Secundario (tanque Clarificador)..... | 11 |
| 2.3.4 Digestor de Lodos..... | 11 |
| 2.3.5 Lechos o Patios de secado | 12 |
| 2.4 Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales con Lagunas de Oxidación..... | 12 |
| 2.4.1 Lagunas de Oxidación Facultativas..... | 12 |
| 2.4.2 Lagunas de Maduración..... | 13 |
| 2.4.3 Lagunas de Oxidación Anaerobias..... | 13 |
| 2.4.3 Lagunas de Oxidación Aerobias o Aireadas..... | 13 |
| 2.5 Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales con Filtros de Medio Granular con recirculación..... | 14 |
| 2.5.1 Trampa de grasas..... | 14 |
| 2.5.2 Fosa Séptica..... | 14 |
| 2.5.3 Lecho Filtrante de medio granular..... | 15 |
| 2.5.4 Tanque de recirculación y dosificación (A)..... | 15 |
| Anexo 1: Eficiencia de Remoción de Patógenas, parámetros convencionales Ventajas y desventajas para varios Sistemas de Tratamiento de aguas residuales..... | 16 |
| 3.0 Glosario y abreviaturas..... | 18 |
| 4.0 Referencias..... | 19 |

INTRODUCCIÓN

En América Central las infecciones relacionadas a las excretas son endémicas y una causa principal de morbilidad y mortalidad. La epidemia de cólera causó 152.311 casos acumulados de 1991 a 1997 en los países de El Salvador, Guatemala, Honduras, y Nicaragua (OPS, 1998). Las infecciones de parásitos intestinales son un problema serio y la prevalencia con infecciones de helmintos intestinales llega hasta más de 60% de la población en muchas áreas (OPS, 1998); Sin duda las aguas superficiales tienen un papel significativo en la continua transmisión de enfermedades relacionadas a las excretas en América Central, especialmente la transmisión de los parásitos intestinales. El nivel de tratamiento de aguas residuales descargadas a las aguas superficiales es casi nulo. (*Stewart Oakley*)

Como primer paso a tomar es concientizarnos de que todos tenemos que participar en resolver el problema de las aguas residuales en los países del CAFTA-DR. El llamado va a los ciudadanos, a las comunidades, a las entidades gubernamentales locales y centrales, a las organizaciones no-gubernamentales, las industrias, los ingenieros sanitarios, y a todos aquellos que se preocupan por la salud y el bienestar del ser humano y de la naturaleza. El concepto de que la contaminación es un problema ajeno no tiene gran significado en el ámbito ambiental, ya que el ambiente no tiene fronteras. Los peligros ambientales que enfrenta un país los enfrentamos todos. El ambiente es un regalo que le fue dado a la humanidad para protegerlo, y no podemos fallar en actuar como un frente unido.

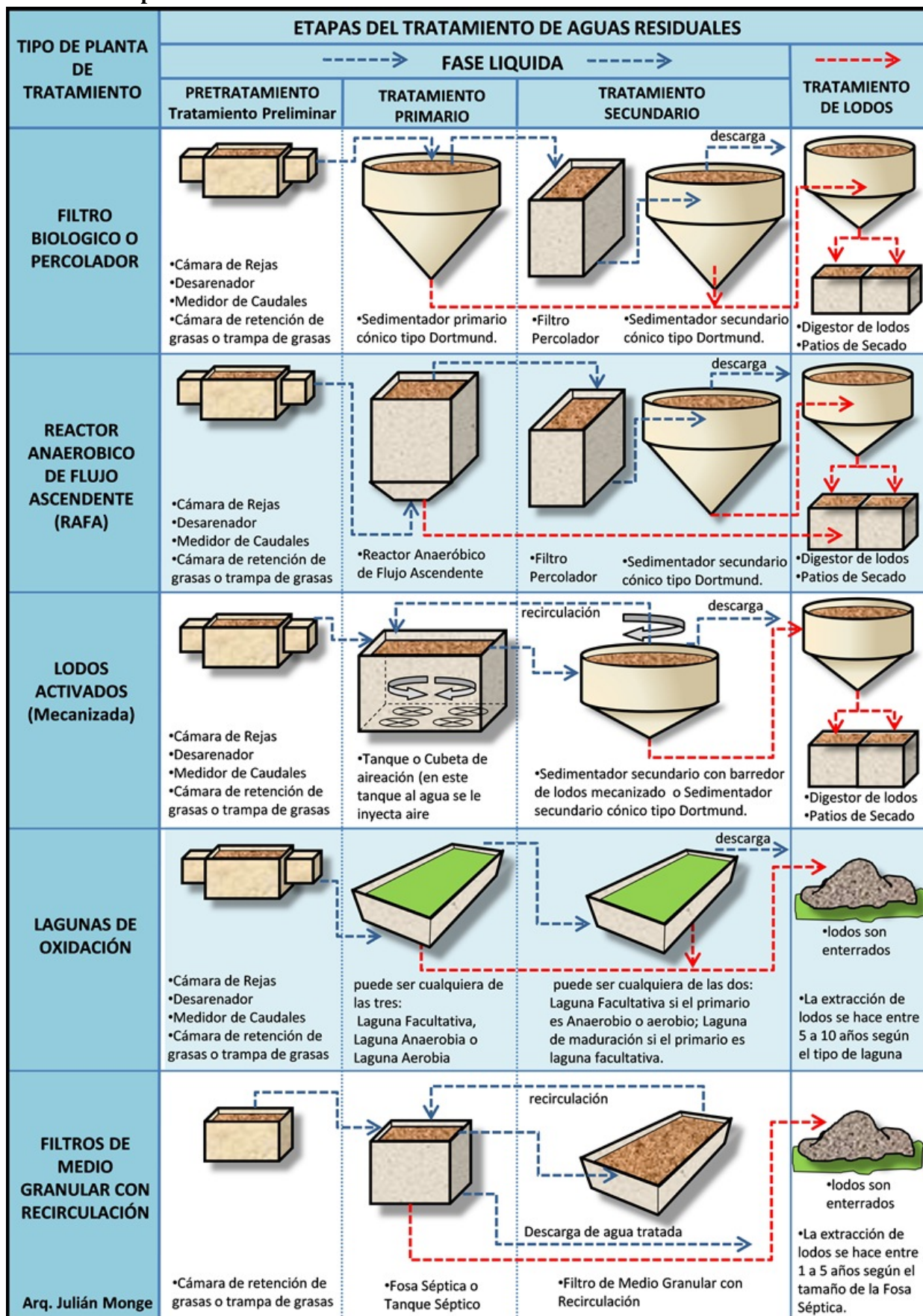
El segundo paso es crear conciencia de que las acciones tomadas por países desarrollados para resolver el problema de las aguas residuales domésticas, pueden no ser viables en países en vías de desarrollo con menos recursos. Estos países deben tomar en consideración su realidad económica, social y cultural individual. En su gran mayoría, los sistemas de tratamiento de aguas residuales utilizadas en países como los Estados Unidos, Alemania, Japón, y otros son costosos para operar, consumen una gran cantidad de energía, y requieren de un nivel especializado de conocimiento técnico. En Centroamérica, tenemos la triste experiencia de contar con muchos sistemas de tratamiento de aguas residuales que fueron construidos con las mejores intenciones, pero que han sido abandonados. En muchos de estos sistemas se utilizaron tecnologías que no fueron las más apropiadas, y como consecuencia los sistemas resultaron ser insostenibles. Los países Centroamericanos deben buscar soluciones que sean sostenibles de acuerdo a la realidad económica y social de cada país. Algunos de los sistemas de tratamiento que se mencionan adelante pueden proveer niveles de tratamiento que son comparables con la eficiencia de remoción obtenida por sistemas más complejos como, por ejemplo, los sistemas de lodos activados. Es importante recordar que en los países desarrollados no se inició obteniendo niveles de descarga de demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos totales de menos de 10 mg/l, sino que se inició obteniendo niveles alcanzables de acuerdo a la tecnología disponible, y los límites de descarga más estrictos se fueron aplicando y alcanzando gradualmente.

El tercer paso a considerar es la participación activa de los entes reguladores en asesorar a los entes ejecutores durante el proceso de selección de los tipos de sistemas de tratamiento de aguas residuales que se utilicen en sus países. El construir sistemas de tratamiento sin considerar todos los retos económicos, sociales y técnicos puede llevar a que estos sistemas fracasen. (*Louis Salguero*)

Esta publicación se ha desarrollado para dar a conocer los conceptos básicos de los sistemas de tratamiento mayormente utilizados en los países del CAFTA-DR. Estos sistemas son: Filtros Percoladores con Sedimentación, Reactor Anaeróbicos de Flujo Ascendente, Lodos Activados, Lagunas de Oxidación y Filtros de Medio Granular con recirculación. A continuación se hace una breve descripción de los estos sistemas de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico y sus diferentes unidades.

Arq. Julián Antonio Monge Vásquez
Consultor para Tratamiento de Aguas Residuales
San Salvador, El Salvador, Centroamérica.

Tabla 1: Etapas de tratamiento en Plantas o Sistemas de Tratamiento utilizados en Centroamérica



Arq. Julián Monge

1.0 ETAPAS DEL TRATAMIENTO EN PLANTAS O SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES UTILIZADAS EN CENTROAMÉRICA:

1.1 PRETRAMIENTO: Es el conjunto de unidades que tienen como finalidad eliminar materiales gruesos, que podrían perjudicar los siguientes procesos del sistema. Los elementos a retener son arena, piedras, plásticos algunos sólidos con diámetros mayores de 2.0 pulgadas y cualquier otro elemento extraño que pueda ser retenido en la criba o en el canal desarenador.

El Pretratamiento es común para todos los sistemas de tratamiento a base de Filtros Percoladores con sedimentación, Reactores Anaeróbicos de Flujo Ascendente, Lodos Activados, o Lagunas de Oxidación, etc., Incluye los siguientes elementos:

- a) Cámara de rejillas o Criba
- b) Un canal desarenador doble contiene dispositivos de control de velocidad de flujo,
- c) Aforador de caudales Parshall o Vertedero en “V”
- d) Cámara de retención de grasas o Trampa de grasas.

1.2 TRATAMIENTO PRIMARIO:

su finalidad es remover sólidos suspendidos que son removidos por sedimentación, filtración, flotación y precipitación. Dentro de estos Sólidos Suspendidos pueden distinguirse:

- a) Los sólidos sedimentables: son los que sedimentan al dejar el agua residual en condiciones de reposo durante cierto tiempo, este tiempo también depende del tamaño del sedimentador
- b) Los sólidos flotantes
- c) Los sólidos coloidales

En general, parte de los Sólidos Suspendidos están constituidos por materia orgánica, consecuencia del tratamiento primario, suele ser la reducción de la DBO. El grado de reducción de éstos índices de contaminación depende del proceso utilizado y de las características del agua residual. Dependiendo el proceso o tipo de tratamiento, se pueden utilizar para el Tratamiento Primario cualquiera de las siguientes unidades que se describirán posteriormente:

- a) Sedimentador Primario
- b) Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente
- c) Tanques o cubetas de Aireación
- d) Lagunas Facultativas
- e) Lagunas Aerobias
- f) Lagunas Anaerobia
- g) Fosa Séptica

1.3 TRATAMIENTO SECUNDARIO:

Su objetivo es el remover material orgánico en suspensión. Se utilizan procesos biológicos, aprovechando la acción de microorganismos, que en su proceso de alimentación degradan o transforman la materia orgánica. El grado de reducción de éstos índices de contaminación depende del proceso utilizado y de las características del agua residual. Para el Tratamiento Secundario dependiendo el tipo o proceso de tratamiento se pueden utilizar cualquiera de las siguientes unidades que se describirán posteriormente:

- a) Filtro Percolador y Sedimentación Secundaria si el tratamiento primario es Sedimentador primario o Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente.
- b) Sedimentación Secundaria en planta de lodos activados.
- c) Laguna de maduración, si el tratamiento primario es Laguna Facultativa.
- d) Laguna Facultativa, si el tratamiento primario es Laguna Anaerobia o Aerobia.
- e) Filtro de Medio Granular con Recirculación, si el tratamiento primario es Fosa Séptica.

1.4 TRATAMIENTO DE LODOS:

Los sólidos primarios gruesos y los bio-sólidos secundarios acumulados en un proceso del tratamiento de aguas residuales se llaman lodos, se deben tratar y disponer de una manera segura. Este material a menudo se contamina inadvertidamente con los compuestos orgánicos e inorgánicos.

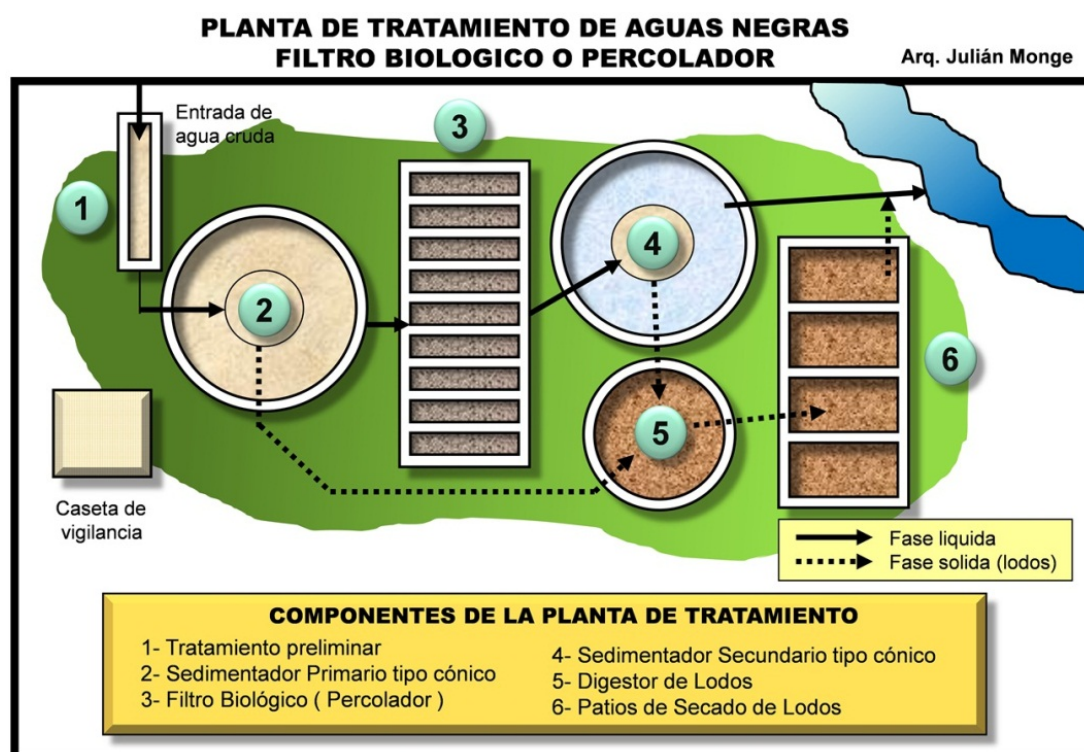
El propósito de la digestión es reducir la cantidad de materia orgánica y el número de los microorganismos presentes en los sólidos que causan enfermedades. Las opciones más comunes del tratamiento incluyen la digestión anaerobia, la digestión aerobia y la deshidratación o secado.

- a) Digestión de lodos: Digestor de lodos Anaeróbico y Digestor de lodos Aeróbico.
- b) Deshidratación o secado de lodos: Filtros Prensa y Patios de Sacado.

2.0 PLANTAS O SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES UTILIZADOS EN CENTRO AMÉRICA.

2.1 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON FILTRO PERCOLADOR

Es un sistema de tratamiento que pone en contacto las aguas residuales sedimentadas con cultivos biológicos y oxígeno, donde los microorganismos convierten las sustancias complejas que están presentes en las aguas principalmente orgánicas en material celular viviente o en sustancias más simples y sedimentables. Trabaja por gravedad, no necesita de energía eléctrica.



El sistema completo consta de los siguientes componentes:

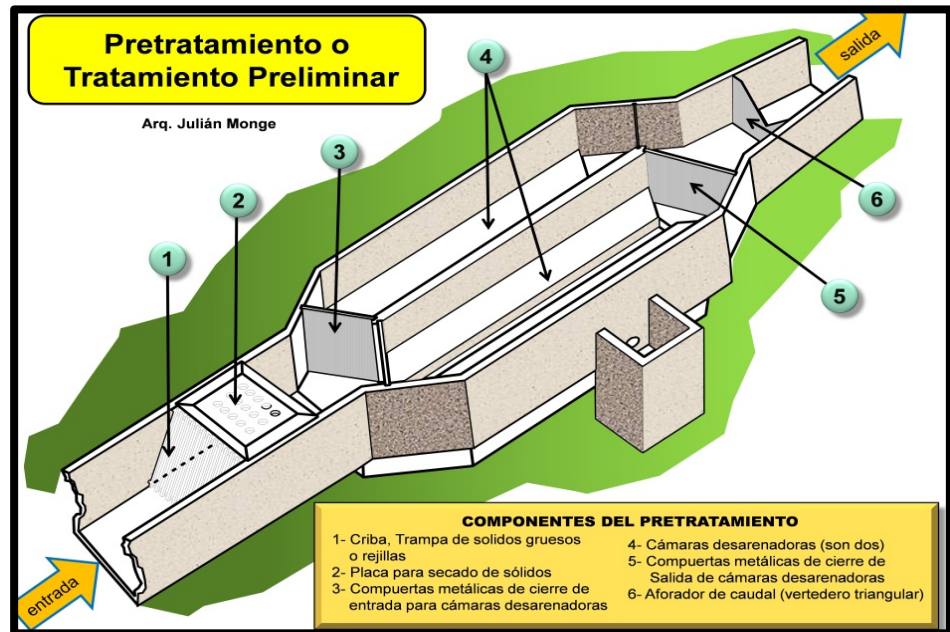
- 2.1.1 Un Pretratamiento (común para todos los sistemas de tratamiento)
- 2.1.2 Un Sedimentador Primario cónico tipo Dortmund
- 2.1.3 Un Filtro Biológico o Percolador
- 2.1.4 Un Sedimentador Secundario cónico tipo Dortmund
- 2.1.5 Un Digestor-Almacenador de lodos.
- 2.1.6 Lechos de Secado

2.1.1 PRETRATAMIENTO

Es el conjunto de unidades que tienen como finalidad eliminar materiales gruesos, que podrían perjudicar los siguientes procesos del sistema. Los elementos a retener son arena, piedras, plásticos algunos sólidos con diámetros mayores de 2.0 pulgadas y cualquier otro elemento extraño que pueda ser retenido en la criba o en el canal desarenador.

El Pretratamiento es común para todos los sistemas de tratamiento a base de Filtros Percoladores con sedimentación, Reactores Anaeróbicos de Flujo Ascendente, Lodos Activados, o Lagunas de Oxidación, etc. Incluye los siguientes elementos:

- 2.1.1.1 Cámara de rejas o Criba.
- 2.1.1.2 Un canal desarenador doble que contiene dispositivos de control de velocidad de flujo.
- 2.1.1.3 Aforador de caudales Parshall o Vertedero en “V”
- 2.1.1.4 Cámara de retención de grasas o Trampa de grasas.



2.1.1.1 CAMARA DE REJAS

En los colectores de aguas negras siempre hay presencia de objetos extraños como arena, piedras, etc. que interfieren negativamente en el funcionamiento de cualquier tipo de sistema de tratamiento. La cámara de rejas es la Primera operación del proceso de tratamiento, tiene como objetivo la remoción de los materiales gruesos, los que pueden perjudicar en la obstrucción de las unidades de tratamiento. Está formada por barras metálicas separadas comúnmente 2.5 cms y colocadas en ángulo de 30 a 60 grados respecto a la horizontal. Los sólidos son separados rastrillándolos para que finalmente sean enterrados o incinerados.



*Cámara de rejas en funcionamiento
(Fotografía: Julián Monge)*

2.1.1.2 CANAL DESARENADOR

Es una estructura diseñada para retener la arena que traen las aguas residuales a fin de evitar que ingresen al sistema de tratamiento consiste en dos canales rectangulares de flujo horizontal que están contruidos en paralelo.

Es una caja que permita la velocidad de sedimentación por gravedad de las arenas; de esta forma se reducirá la acumulación de depósitos pesados en la tuberías, por consiguiente los requerimientos de limpieza serán menores en el reactor anaeróbico de flujo Ascendente, en el Filtro Percolador y en el sedimentador Secundario.

*Al frente Cámara de rejas, al fondo Canales desarenadores
(Fotografía: Julián Monge)*



2.1.1.3 AFORADOR O MEDIDOR DE CAUDALES:

A) **Vertedero en “V”**, consiste en una barrera o placa fabricada de lámina de hierro de 1/8” de espesor con una abertura a 90° sobre el vértice; permite medir la carga hidráulica o caudal de entrada a la planta de tratamiento.

Fotografía de vertedero en “V”

(Fotografía: Stewart Oakley)



B) **CANALETA PARSHALL**: son prefabricadas hechas de fibra de vidrio. Las dimensiones de las canaletas Parshall que se venden son estandarizadas y se utilizan para obtener mediciones de caudal. Se procede a medir el nivel de agua en el área de medición y luego se aplica una formula calibrada para tal efecto.

Vista superior de una canaleta Parshall

(Fotografía: Stewart Oakley)



2.1.1.4 TRAMPA DE GRASAS

Sistema conectado al final del Pretratamiento, que permite la retención de los elementos contaminantes como grasas, aceites, y en cierta forma, sólidos suspendidos, que se encuentran en las aguas residuales y que interfieren en los procesos biológicos.

Cámara de retención de grasas

(Fotografía: Julián Monge)



2.1.2 SEDIMENTADOR PRIMARIO TIPO DORTMUND

Se construye de concreto tiene forma cónica; mantiene en reposo el agua y logra que los sólidos sedimentables decanten y caigan al fondo de la unidad. Permite que muchos flotantes que no son retenidos en las rejillas, sean retenidos en la pantalla central. En estas unidades no se tratan los lodos por lo que necesitan de tratamiento adicional que es el Digestor de lodos, estos son evacuados hacia el digestor por presión hidrostática.

Sedimentador Primario Dortmund.

(Fotografía: Julián Monge)



2.1.3 FILTRO BIOLOGICO O PERCOLADOR

Es un tanque rectangular o cilíndrico empacado con material plástico o escoria volcánica de diámetro entre 7 y 10 centímetros en la cual se formará una película biológica superficial compuesta por una gran variedad de microorganismos aeróbicos los cuales absorben y mineralizan las sustancias contenidas en el agua residual. En el proceso de biopercolación, el efluente proveniente del Sedimentador primario es introducido en los de filtros por medio de canaletas rociadoras que garantizan una distribución uniforme sobre el medio filtrante. En esta fase final la eficiencia será mayor del 85%.



Filtro Percolador en funcionamiento

(Fotografía: Julián Monge)

2.1.4 SEDIMENTADOR SECUNDARIO TIPO DORTMUND

Esta unidad es similar al sedimentador primario, diferenciándose generalmente en que sus dimensiones son más grandes porque corresponden a diferentes periodos de retención. A la salida de este sedimentador la eficiencia final en el tratamiento será mayor del 90%. El agua que sale del filtro percolador arrastra partículas de la película biológica que se muere y desprende del material pétreo; este sedimentador se utiliza para remover ese material desprendido.



Sedimentador Secundario (Fotografía: Julián Monge)

2.1.5 DIGESTOR DE LODOS

Es una estructura de forma tronco-cónica. El digestor de lodos almacenará, espesará y digerirá los lodos provenientes de los sedimentadores. La digestión de los lodos se logra mediante una intensa actividad de bacterias anaerobias y tiempo para tal estabilización, depende de la temperatura ambiente; en climas tropicales cálidos, el período para digerir lodos oscila de uno a cuatro meses.

Digestor de Lodos en funcionamiento (Fotografía: Julián Monge)



2.1.6 LECHOS o PATIOS DE SECADO

Es común para cualquier tipo de tratamiento por lo tanto se utiliza en cualquier Sistema. Esta es la forma de tratamiento de lodos más sencilla. Su función es la deshidratación de los lodos por medio de la filtración y evaporación, para esto, los lodos digeridos se descargan y extienden en patios de fondo permeable, el espesor de capas de lodo en los patios de secado será de 15 a 30 cms. como máximo, para agilizar la deshidratación se recomienda que los patios de secado tengan la superficie expuesta al aire y el sol.



Patios de secado con lodos secos (Fotografía: Julián Monge)

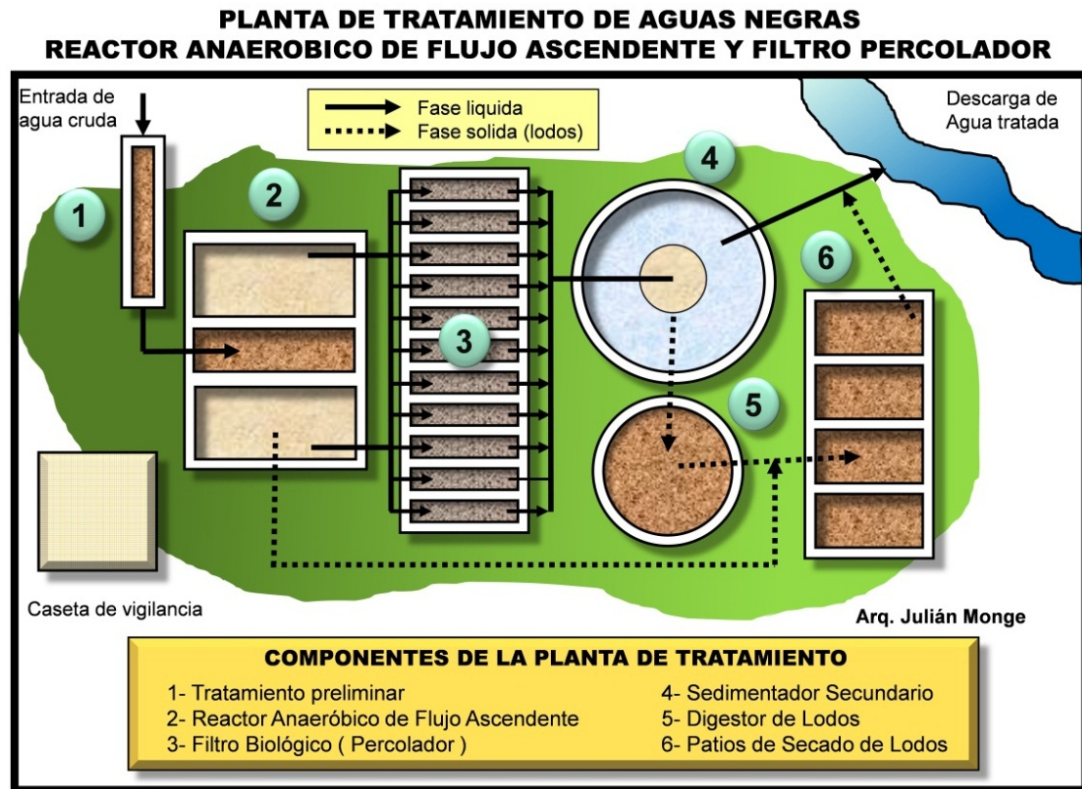
2.2 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE (RAFA)

Es una forma de digestor anaeróbico que se utiliza en el tratamiento de aguas residuales. El reactor es un digestor metanogénico (productor de gas metano). El proceso anaeróbico de flujo ascendente consiste básicamente de un tanque Imhoff, "al revés", presentando las cámaras de decantación y digestión anaeróbica superpuestas y en la parte superior cuenta con un sistema de separación de gas-líquido-sólido.

El tiempo de retención hidráulica es entre 6 y 24 horas, esto dependiendo la temperatura del lugar donde se construirá el sistema de tratamiento. Este, al igual que el anterior trabaja por gravedad, no necesita de energía eléctrica..

La planta completa consta de los siguientes componentes:

- 2.2.1 Un Tratamiento Preliminar
- 2.2.2 Un Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente (RAFA)
- 2.2.3 Un Filtro Biológico o Percolador.
- 2.2.4 Un Sedimentador Secundario cónico tipo Dortmund.
- 2.2.5 Un Digestor-Almacenador de lodos cónico.
- 2.2.6 Lechos de Secado de Lodos.



2.2.1 PRETRATAMIENTO

El Tratamiento preliminar o Pretratamiento es común para los sistemas de tratamiento con Reactores Anaeróbicos de Flujo Ascendente, Filtros Percoladores, Lodos Activados o Lagunas de Oxidación, etc. (Ver numeral 2.1.1)

2.2.2 REACTOR ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE (como unidad)

Después de la etapa preparatoria (Pretratamiento), da inicio la primera etapa del tratamiento biológico la cual incluye una unidad de tratamiento denominada Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

Se utiliza para la remoción de carga orgánica la cual puede alcanzar valores de eficiencia en el rango de 50 hasta el 70%, opera bajo condiciones de demandas pico, la capacidad de estabilizar algunos elementos tóxicos comunes en las aguas residuales que pueden ser perjudiciales en la siguiente fase de tratamiento (Filtro Percolador) protegiendo así su equilibrio biológico.

construcción de un Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente(RAFA), losa superior del tanque, (Fotografía: Julián Monge)



2.2.3 FILTRO BIOLOGICO O PERCOLADOR

En el proceso de biopercolación, el efluente proveniente del Reactor Anaeróbico (RAFA), es introducido en los de filtros por medio de canaletas rociadoras que garantizan una distribución uniforme sobre el medio filtrante, que puede tener una altura de 9 mts. distribuidos en módulos de 3 mts. (Ver numeral 2.1.3)

*Filtro Percolador en funcionamiento
(Fotografía: Julián Monge)*



2.2.4 SEDIMENTADOR SECUNDARIO TIPO DORTMUND

Esta unidad es similar al sedimentador primario, diferenciándose generalmente en sus dimensiones más grandes que corresponden a diferentes periodos de retención. A la salida de este sedimentador la eficiencia final en el tratamiento será mayor del 90%. El agua que sale del Reactor Anaeróbico arrastra partículas pequeñas que en esta unidad son retenidas.

*Sedimentador Secundario
(Fotografía: Julián Monge)*



2.2.5 DIGESTOR DE LODOS

Es una estructura de forma tronco-cónica. El digestor de lodos Almacenará, espesará y digerirá los lodos provenientes del sedimentador secundario, los lodos del RAFA van directamente a los patios de secado. La digestión de los lodos se logra mediante una intensa actividad de bacterias anaerobias y tiempo para tal estabilización, depende de la temperatura ambiente; en climas tropicales cálidos, el período para digerir lodos oscila de uno a cuatro meses.

*Digestor de Lodos en funcionamiento
(Fotografía: Julián Monge)*



2.2.6 PATIOS o LECHOS DE SECADO

Es común para cualquier tipo de tratamiento por lo tanto se utiliza en cualquier Sistema. Esta es la forma de tratamiento de lodos más sencilla. Su función es la deshidratación de los lodos, para esto, los lodos digeridos se descargan y extienden en patios de fondo permeable, el espesor de capas de lodo en los patios de secado será de 15 a 30 cms como máximo.

*Patios de secado con lodos recién vertidos
(fotografía: Stewart Oakley)*



2.3 SISTEMA DE TRATAMIENTO CON LODOS ACTIVADOS AIREACION PROLONGADA

Este proceso es más utilizado en países económica y tecnológicamente avanzados, para darle tratamiento a grandes caudales de aguas residuales. Este sistema usa millones de microorganismos para tratar las aguas residuales. Con La alimentación, crecimiento y reproducción, los organismos hacen el trabajo de remover materiales de desecho disueltos y suspendidos en el agua. Este es un sistema mecanizado que consume mucha energía eléctrica.

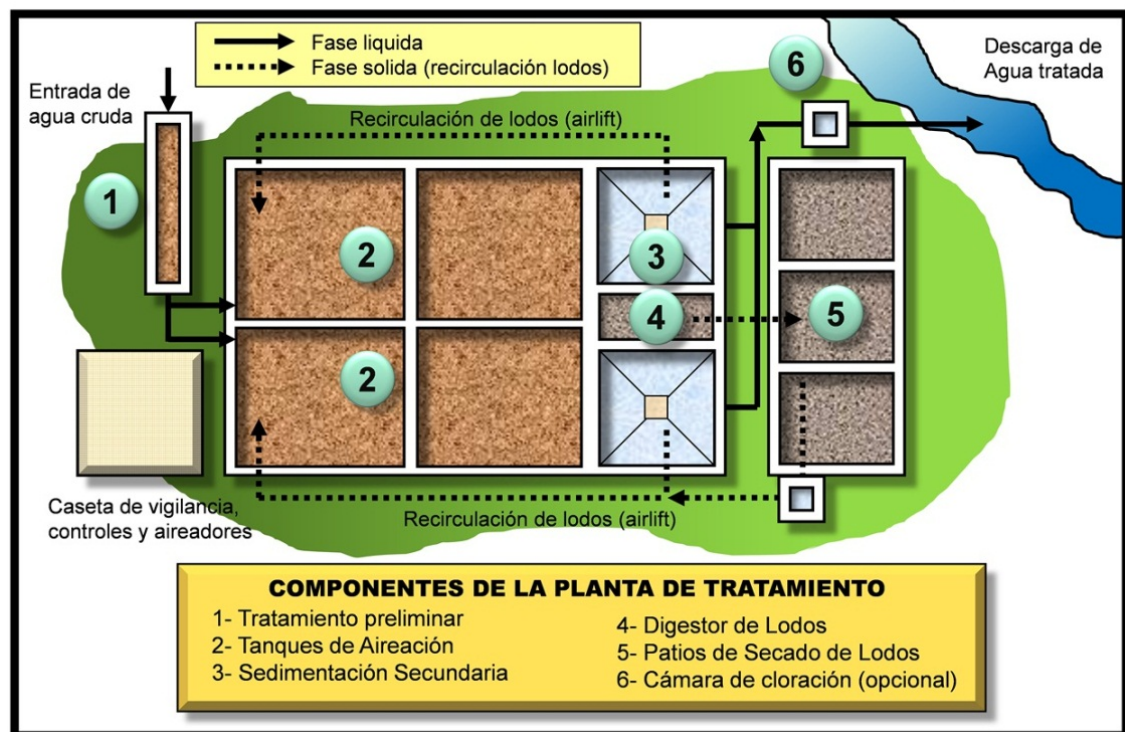
El lodo activado es un proceso de tratamiento por el cual el agua residual y el lodo biológico con microorganismos son mezclados y airados en un tanque denominado aireador, los flóculos biológicos formados en este proceso se sedimentan en un tanque de sedimentación, lugar del cual son recirculados nuevamente al tanque 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 (aireadores superficiales, sopladores, etc.) los cuales tiene doble función que es producir mezcla completa y agregar oxígeno al medio para que el proceso se desarrolle.

El sistema completo consta de los siguientes componentes:

- 2.3.1 Un Tratamiento Preliminar.
- 2.3.2 Un Tanque o cubeta de aireación, con sus equipos de aireación.
- 2.3.3 Un Sedimentador Secundario incluye el sistema de retorno de lodos.
- 2.3.4 Un Digestor-Almacenador de lodos cónico.
- 2.3.5 Lechos o patios de Secado de Lodos.

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS NEGRAS MECANIZADA Lodos Activados

Arq. Julián Monge



2.3.1 PRETRATAMIENTO

El Tratamiento preliminar o Pretratamiento es común para los sistemas de tratamiento con Reactores Anaeróbicos de Flujo Ascendente, Filtros Percoladores, Lodos Activados o Lagunas de Oxidación, etc. (Ver numeral 2.1.1)

2.3.2 TANQUE O CUBETA DE AIREACION (REACTORES BIOLOGICOS)

Son tanque metálicos o de concreto con una profundidad promedio de 4.00 mts. Son llamados “reactores biológicos” porque ellos proporcionan el ambiente y el tiempo necesario para que ocurra el proceso de estatización biológica. El mantenimiento de las condiciones aeróbicas requiere suficiente oxígeno.

El oxígeno, por lo general es proporcionado por cualquiera de los siguientes procesos:

- a) Aireadores mecánicos: de superficie, rotores horizontales o aireadores de turbina sumergida.
- b) Sistemas de aire difuso que requieren ventiladores o compresores, cabezales de aire y difusores.



*Compresores (blowers), para aireación
En cuarto de controles (Foto: Julián Monge)*



varios aireadores superficiales instalados en una cubeta o tanque de aireación (Foto: Julián Monge)



Tanque o cubeta de aireación en funcionamiento en una planta de lodos activados. (Fotografía: Julián Monge)

2.3.3 SEDIMENTADOR SECUNDARIO (TANQUE CLARIFICADOR).

En este tanque, los sólidos biológicos se deben separar por sedimentación o gravedad, produciendo agua limpia que sale del clarificador.

Para producir una buena sedimentación del fango activado los sólidos biológicos no pueden ser demasiado jóvenes ni demasiado viejos; el fango no debe contener cantidades excesivas de fibras biológicas (filamentos).

El retorno de los sólidos biológicos del fondo del clarificador al tanque de aireación se efectúa por medio de una variedad de mecanismos de bombeo: Bombas elevadoras de agua por aire (airlift), Bombas centrifugas, etc., esta es la activación de los lodos o fangos.



Planta de lodos activados modalidad aireación prolongada. (Foto: J. Monge)

2.3.4 DIGESTOR DE LODOS

El digestor de lodos Almacenará, espesará y digerirá los lodos en exceso provenientes de los sedimentadores secundarios. Para evitar olores desagradables la digestión de los lodos se logra mediante la inyección de aire para que haya intensa actividad de bacterias aerobias y un tiempo para tal estabilización, depende de la temperatura ambiente; en climas tropicales cálidos, el período para digerir lodos oscila de uno a cuatro meses.

*Digestor de lodos en una Planta de lodos activados.
(Foto: Julián Monge)*



2.3.5 LECHOS o PATIOS DE SECADO

Es común para cualquier tipo de tratamiento por lo tanto se utiliza en cualquier Sistema. Su función es la deshidratación de los lodos, estos lodos digeridos se descargan y extienden en patios de fondo permeable.

Patios de secado de lodos en una Planta de lodos activados. (Foto: Julián Monge)



2.4 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON LAGUNAS DE OXIDACION

Las lagunas de oxidación son excavaciones de poca profundidad en la cual se desarrolla una población microbiana compuesta por bacterias, algas y protozoos que eliminan en forma natural los patógenos relacionados con aguas residuales. Existen varios tipos de lagunas para el tratamiento de aguas residuales, pueden se clasifican en:

- 2.4.1 Lagunas de oxidación facultativas
- 2.4.2 Lagunas de maduración
- 2.4.3 Lagunas de oxidación anaerobias (sin aireación)
- 2.4.4 Lagunas de oxidación aerobias (aireadas)



2.4.1 LAGUNAS DE FACULTATIVAS

Pueden ser de dos tipos: laguna facultativas primarias que reciben aguas residuales crudas y laguna facultativas secundarias que reciben aguas sedimentadas de la etapa primaria (usualmente el efluente de una laguna anaerobia); son diseñadas para remoción de DBO5 con base en una baja carga orgánica superficial que permita el desarrollo de una población de algas activa. De esta forma, las algas generan el oxígeno requerido por las bacterias heterotróficas para remover la DBO5 soluble.



Laguna de Oxidación tipo Facultativa (foto: Stewart Oakley)

Una población saludable de algas le confiere un color verde oscuro al agua. Por la presencia de bacterias fotosintéticas púrpuras oxidantes del sulfuro estas lagunas pueden tornarse ocasionalmente rojas o rosadas. Este cambio en la ecología de las lagunas facultativas ocurre debido a ligeras sobrecargas. De esta forma, el cambio de coloración en lagunas facultativas es un buen indicador cualitativo del funcionamiento del proceso de degradación. El tiempo de retención hidráulica nominal, (TRH) es de 10 días mínimas para remover huevos de helmintos en lagunas facultativas.

2.4.2 LAGUNAS DE MADURACIÓN

Estas lagunas reciben el efluente de una laguna facultativa y su tamaño y número depende de la calidad bacteriológica requerida en el efluente final. Las lagunas de maduración son unidades poco profundas (1.0-1.5 m) y presentan menos estratificación vertical, al tiempo que exhiben una buena oxigenación a través del día en todo su volumen

*Laguna secundaria o de maduración.
(Fotografía: Julián Monge)*



2.4.3 LAGUNAS DE OXIDACION ANAEROBIAS

Por lo general tienen una profundidad de 3 a 5 mts. y reciben altas cargas orgánicas volumétricas que producen condiciones anaerobias estrictas (oxígeno disuelto ausente) en todo el volumen de la laguna. En general, las lagunas anaerobias funcionan como tanques sépticos abiertos y trabajan muy bien en climas calientes. Una laguna anaerobia bien diseñada puede alcanzar remociones de DBO5 alrededor del 60% a temperaturas de 20°C. Un TRH de 1 día es suficiente para aguas residuales con una DBO5 de hasta 300 mg/l y temperaturas superiores a 20°C.



*Laguna de Oxidación tipo Facultativa
(fotografía: Stewart Oakley)*

2.4.4 LAGUNAS DE OXIDACION AEROBIAS

Las lagunas de oxidación aerobias o aireadas reciben el oxígeno de los sistemas de aire mecánico o difuso. Esto se contrasta con las lagunas de estabilización las cuales obtienen el oxígeno de la fotosíntesis y la aireación superficial. Estas lagunas han sido clasificadas por algunos, por la cantidad de la mezcla proporcionada. Si se proporciona suficiente energía para mantener todos los sólidos en suspensión, se les ha denominado laguna de mezcla completa.

*Laguna de oxidación aireada.
(fotografía: Bruce Henry)*

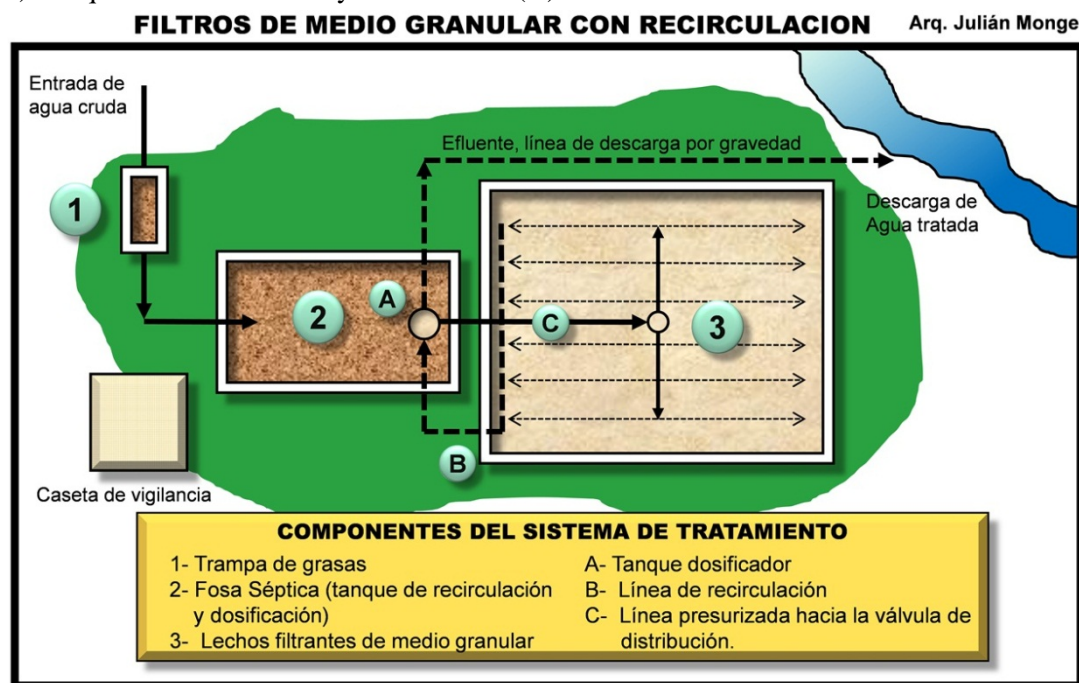


2.5 SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON FILTROS DE MEDIO GRANULAR CON RECIRCULACION

La filtración es una operación unitaria de gran importancia dentro de un sistema de tratamiento y acondicionamiento de aguas. Generalmente esta se efectúa después de la separación de la mayoría de los sólidos suspendidos por sedimentación. Este sistemas incluyen unidades de sedimentación primaria (fosas o tanques sépticos), tanques de recirculación, controles electrónicos para las bombas de recirculación, lechos filtrantes de medio granular, y unidades de desinfección (si es necesario). Típicamente, los filtros de medio granular con recirculación pueden alcanzar buenos niveles de tratamiento.

El sistema completo consta de los siguientes componentes:

- 2.5.1) Una Cámara de retención de grasas o Trampa de grasas,
- 2.5.2) Un Tanque Séptico o Fosa Séptica
- 2.5.3) Un Lecho filtrante de medio granular
- 2.5.4) Tanque de Recirculación y Dosificación (A)



2.5.1 TRAMPA DE GRASAS

Sistema conectado al final del Pretratamiento, que permite la retención de los elementos contaminantes como grasas, aceites, y en cierta forma, sólidos suspendidos, que se encuentran en las aguas residuales y que interfieren en los procesos biológicos.

*cámara de retención de grasas
(fotografía: Julián Monge)*



2.5.2 FOSA SÉPTICA

son unidades de tratamiento primario de las aguas negras domésticas que combinan los procesos de sedimentación y digestión anaerobia de lodos, usualmente se diseñan con dos cámaras que operan en serie. Se trata de una forma sencilla y barata de tratar las aguas negras y está indicada para zonas rurales o residencias situadas en parajes aislados. Sin embargo, el tratamiento no es tan completo como en una estación para tratamiento de aguas negras.

Las fosas sépticas son las primeras unidades del sistema de tratamiento. En éstas se lleva a cabo la sedimentación de sólidos que normalmente se maneja en una planta de tratamiento convencional por clarificadores primario. Estas fosas deben ser herméticas y deben disponer de un puerto de inspección. La hermeticidad de las fosas es fundamental para minimizar problemas hidráulicos causados por infiltración.

Planta piloto de tratamiento con Filtro de medio granular (fotografía: Louis Salguero)



2.5.3 LECHO FILTRANTE DE MEDIO GRANULAR

El lecho del filtro de medio granular se puede construir de forma superficial o subterránea. Si se presentan condiciones en las que el manto freático es alto, es preferible construir sobre la superficie. El medio granular en el lecho consiste de tres capas: inferior, intermedia y superior. La capa inferior de 6 a 38 mm de grava brinda soporte a la capa intermedia, que se construye usando un material filtrante de medio fino. La capa inferior también cubre la línea de retorno que va al tanque de recirculación.

Construcción de un filtro de medio granular (fotografía: Louis Salguero)



2.5.4 TANQUE DE RECIRCULACIÓN Y DOSIFICACIÓN (A)

El efluente de las fosas sépticas fluye normalmente por gravedad al tanque de recirculación. El tiempo de detención recomendado para el diseño del tanque de recirculación es de 24 horas basado en el caudal promedio diario. Las dimensiones del tanque basadas en el caudal promedio diario toman en cuenta los caudales máximos esperados.

Los tanques de recirculación para las plantas piloto en fueron construidos tomando en consideración los criterios anteriores. Se utilizó un filtro “Biotube®” (Biotubo), que consiste de un sujetador plástico y el filtro de Biotubo que se desliza dentro y fuera del sujetador.



Izquierda: pozo para las bombas, flotadores y el Biotubo, lista para ser bajados a través del acceso al tanque de recirculación, derecha: Filtro Biotubo grande en el punto de descarga de un tanque séptico (fotos: Louis Salguero)

Anexo 1: Eficiencia de Remoción de Patógenas, parámetros convencionales, Ventajas y desventajas para varios Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales

| Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales | Remoción % | | Remoción CICLOS Log ₁₀ ⁽⁵⁾ | | | | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|---|------------|---------------------|--|-----------|---------------------|-------------------------|--|--|
| | DBO5 | Sólidos Suspendedos | VIRUS | Bacterias | Huevos de Helmintos | Quistes de Protozoarios | | |
| Lodos Activados¹ | | | | | | | No necesita grandes extensiones de terreno y se puede construir en terrenos con topografía plana o quebrada. | Los costos construcción, de operación y mantenimiento son altos, necesitan equipos electromecánicos y energía eléctrica. |
| | 55 a 95 | 55 a 95 | 1 a 2 | 0 a 2 | 0 a 1 | 1 a 2 | Fácil de estabilizar durante el arranque y tiene gran capacidad para recuperarse | Los trabajos de mantenimiento son mayores y se requiere de personal calificado |
| | | | | | | | Si los equipos electromecánicos funcionan los posibles malos olores son mínimos. | Si hay prolongados cortes de energía eléctrica la posibilidad de malos olores son grandes. |
| | | | | | | | | Los equipos electromecánicos por lo general no se encuentran en plaza. |
| Filtro Percolador¹ | | | | | | | Los costos de operación y mantenimiento son mínimos no requiere de energía eléctrica | Los costos construcción son altos son fabricadas en concreto armado. |
| | 50 a 95 | 50 a 95 | 1 a 2 | 0 a 2 | 0 a 1 | 1 a 2 | Funciona por gravedad, no necesita equipos electromecánicos | Para que funcione por gravedad necesita una diferencia de altura de 10 mts. o más |
| | | | | | | | No necesita grandes extensiones de terreno y se puede construir en terrenos con topografía quebrada. | Puede darse la generación de posibles malos olores y proliferación de moscas. |
| | | | | | | | | Es posible la obstrucción del medio filtrante |
| Reactor Anaeróbico² | | | | | | | Los costos de operación son mínimos, no requiere energía eléctrica | Los costos construcción son altos son fabricadas en concreto armado. |
| | 50 a 95 | 50 a 95 | 1 a 2 | 0 a 2 | 0 a 1 | 1 a 2 | No necesita grandes extensiones de terreno y se puede construir en terrenos con topografía quebrada. | La estabilización durante el arranque puede tardar hasta 3 meses y su recuperación es lenta. |
| | | | | | | | Funciona por gravedad, no necesita equipos electromecánicos | Puede darse la generación de posibles malos olores. |
| Filtros Medio Granular con Recirculación | | | | | | | Se puede utilizar para pequeñas comunidades de menos de 100 viviendas. | Los costos construcción son altos, necesitan equipos electromecánicos y energía eléctrica. |
| | 85 a 95 | 85 a 95 | 1 a 2 | 0 a 2 | 0 a 1 | 1 a 2 | Los equipos trabajan automáticamente, el mantenimiento es mínimo. | Los equipos electromecánicos por lo general no se encuentran en plaza. |
| | | | | | | | Funciona en terrenos con nivel freático casi superficial. | Es posible la obstrucción del medio filtrante |

Anexo 1: Eficiencia de Remoción de Patógenas, parámetros convencionales, Ventajas y desventajas para varios Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (continuación)

| Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales | Remoción % | | Remoción CICLOS Log ₁₀ ⁽⁵⁾ | | | | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|--|------------------|-----------------|--|-----------|---------------------|-------------------------|---|--|
| | DBO ₅ | SS | VIRUS | Bacterias | Huevos de Helmintos | Quistes de Protozoarios | | |
| Lagunas de Oxidación en serie⁴ | | | | | | | Construcción simple y económica. | Necesita grandes extensiones de terreno |
| | | | | | | | Los trabajos de mantenimiento son mínimos, no se requiere de personal calificado | El rendimiento y tamaño dependen del clima. |
| | 70 | 55 | 2 | 2 | 2 | 2 | Los costos de operación son mínimos, no necesitan energía eléctrica | Puede darse la generación de posibles malos olores. |
| | a | a | a | a | a | a | Es el sistema que remueve más patógenos. | Su construcción se debe hacer en terrenos con topografía plana. |
| | 95 | 95 ³ | 4 | 6 | 4 | 4 | Flexibilidad de operación en diversas condiciones, acepta grandes variaciones de caudal. | |
| | | | | | 100% | 100% | La evacuación de lodos se hace cada 5 a 10 años | |
| Lagunas de Oxidación Aireadas | | | | | | | Menor área ocupada comparada con las lagunas facultativas y de maduración. | Los costos construcción, de operación y mantenimiento son altos; necesitan equipos electromecánicos y energía eléctrica. |
| | 70 | 55 | 1 | 2 | 1 | 1 | Ausencia de algas, una vez que el oxígeno necesario para la estabilización de la materia orgánica es proporcionado por los equipos de aireación | Mayor concentración de sólidos biológicos en el efluente. |
| | a | a | a | a | a | a | | Los equipos electromecánicos por lo general no se encuentran en plaza. |
| | 95 | 95 ³ | 2 | 4 | 3 | 3 | | |

1- Precedidos y seguidos de sedimentación.

2- Seguidos de sedimentación.

3- Dependiendo del número de lagunas en serie, tiempo de retención hidráulica, y factores de diseño físico.

4- El efluente de lagunas puede contener altas concentraciones de SS en forma de algas.

5- Un ciclo log₁₀ = 90% remoción; 2 ciclos = 99%; 3 ciclos = 99.9%; etc. Las lagunas pueden remover 100% de los huevos de helmintos y 100% de los quistes de protozoarios.

Fuentes: Feachem et al., 1983; Mara et al., 1992; Yáñez, 1992.

3.0 GLOSARIO Y ABREVIATURAS:

- 1 **Aguas Residuales:** Es el agua resultante de cualquier uso, proceso u operaciones de tipo agropecuario, doméstico, comercial e industrial.
- 2 **Aceites y Grasas:** sustancia química no mezclable en el agua pero soluble en solventes designados en los métodos de análisis de aceites y grasas.
- 3 **Biodegradable:** sustancias susceptibles de sufrir procesos en los cuales los compuestos químicos son destruidos por la acción de los organismos.
- 4 **Contaminación:** Es la alteración de la calidad física, química, biológica y radiactiva del agua.
- 5 **Coliformes Fecales:** Grupo bacteriano presentes en los intestinos de los mamíferos y los suelos, que representan una indicación de la contaminación fecal del agua. Son fáciles de identificar y contar en laboratorio por su capacidad de fermentar la lactosa.
- 6 **Cuerpo Receptor:** Accidente Geográfico en el cual son vertidas las aguas residuales.
- 7 **Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días (DBO⁵):** Cantidad de oxígeno necesaria para la estabilización biológica de la materia orgánica biodegradable. Demora aproximadamente 5 días
- 8 **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** La cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación química fuerte de sustancias susceptibles, de origen inorgánico y orgánico presentes en el agua. Demora aproximadamente 3 horas.
- 9 **Efluente:** Se entiende como el caudal de agua que sale de una planta de tratamiento o sistema de tratamiento.
- 10 **Excrementos:** residuos de la digestión alimenticia y acción bacteriológica producida en el tracto gastrointestinal.
- 11 **Fango:** otra palabra utilizada, es igual a lodos.
- 12 **Fecal:** de o relacionado a excrementos.
- 13 **Helminto:** Gusano parásito del intestino del hombre y de los animales.
- 14 **Infiltración:** Entrada de agua subterránea al sistema de recolección a través de las uniones de tuberías, paredes de las alcantarillas y tuberías vencidas.
- 15 **Patógenos:** Microorganismos que originan y desarrollan las enfermedades.
- 16 **Quistes:** Una etapa en el ciclo de la vida de los protozoos.
- 17 **Séptico:** Podrido, de mal olor, anaeróbico.
- 18 **Sistemas de Alcantarillado Sanitario:** Conjunto o sistema de obras, instalaciones y servicios que tienen por objeto la evacuación y disposición final de las aguas residuales; tal conjunto o sistema comprende: las alcantarillas sanitarias con sus pozos de visita; los colectores maestros, de descarga y los sistemas de tratamiento.
- 19 **Sólidos Sedimentables (SS):** Materia presente en el agua que se deposita por acción de la gravedad, en un tiempo máximo de dos horas, en base a marcha analítica estándar como Imhoff.
- 20 **Sólidos Suspendidos o en Suspensión:** Fracción de sólidos que no sedimentan en un tiempo de dos horas en base a marcha analítica estándar como Imhoff, constituidos mayormente por materia orgánica.
- 21 **Sólidos Totales (ST):** La cantidad de sólidos (mg/l), que se encuentran en una muestra de agua después de su evaporación a 103-105° C.
- 22 **Tratamiento:** Es el proceso o serie de procesos a los que se someten las aguas residuales, con el objeto de disminuir o eliminar características perjudiciales de los contaminantes a la infraestructura de alcantarillado y a los procesos biológicos a los que se sometan, a fin de cumplir con las normas técnicas de calidad ambiental vigentes.
- 23 **Tratamiento Primario:** su finalidad es remover sólidos suspendidos que son removidos por sedimentación, filtración, flotación y precipitación.
- 24 **Tratamiento Secundario:** su finalidad es remover material orgánico en suspensión. Se utilizan procesos biológicos, aprovechando la acción de microorganismos, que en su proceso de alimentación degradan la materia orgánica.
- 25 **Virus:** Agentes microscópicos infecciosos causantes de muchas enfermedades.

*Norma Salvadoreña NSR 13.07.03:00, Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Receptor
Doreen Salazar, "Guía para el manejo de excretas y Aguas Residuales Municipales", Proarca/Sigma,*

4.0 REFERENCIAS

- 1) Stewart Oakley, Louis Salguero, Bruce Henry, Julián Monge, Pedro Saravia y Julio Moscoso “Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Centroamérica Un Manual de Experiencias, Diseño, Operación y Sostenibilidad”
- 2) Arturo Pazos Ing. Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (E.R.I.S), Universidad de San Carlos de Guatemala. Curso: “Tecnología apropiada para el tratamiento de aguas negras”, año 1988.
- 3) Metcalf & Eddy, “Ingeniería de Aguas Residuales, Tratamiento, Vertido y Reutilización”, tomo 1, año 1997.
- 4) Sergio Rolim Mendonça, Ing. M.Sc. “Lagunas Aireadas Mecánicamente”, Organización Panamericana de la Salud (OPS), 1999
- 5) Miguel Mansur Aisse, Ing. HTD 27: “Tratamiento de aguas residuales en reactores anaeróbicos, de flujo ascendente, en manto de lodos”. Año 2000
- 6) Julián Monge, “Experiencias en el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico en El Salvador”, año 2001.
- 7) Doreen Salazar, “Guía para el manejo de excretas y Aguas Residuales Municipales”, Proarca/Sigma, año 2003.
- 8) Miguel Ricardo Peña Varón, Dr. Universidad del Valle, Instituto Cinara. Cali, Colombia “Lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales”; año 2005.
- 9) Stewart M. Oakley, Dr. Consultor de Ingeniería Sanitaria Profesor/Investigador de Ingeniería Ambiental Universidad Estatal de California. “LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN EN HONDURAS, Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad”, Junio 2005.
- 10) The Texas A&M University, División de entrenamiento del agua y aguas de desecho; Manual “Operaciones Básicas con las Aguas Residuales”.
- 11) Norma Salvadoreña NSR 13.07.03:00, “Aguas Residuales Descargadas a un Cuerpo Receptor”