



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“INVESTIGACIÓN DE LAS VARIABLES DE DISEÑO
GENERAL DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA
RESIDUAL”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

PRESENTA

ITZEL GABRIELA TEMIS GARCÍA

TUTOR DE TESIS

JUAN MARIO MORALES CABRERA



CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.

2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE:	Profesor: Morales Cabrera Juan Mario
VOCAL:	Profesor: Luna Pabello Víctor Manuel
SECRETARIO:	Profesor: Lazcano Arriola Luz María
1er. SUPLENTE:	Profesor: Moreno Xochicale José Arturo
2° SUPLENTE:	Profesor: Duran Moreno Alfonso

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: CD. MX.

ÍNDICE

RESUMEN.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS PARTICULARES.....	12
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS PARTICULARES.....	12
3. ANTECEDENTES.....	13
3.1 DESARROLLOS EN LOS TRATAMIENTOS DE AGUA RESIDUAL.....	13
3.2 DEFINICIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL MUNICIPAL.....	16
4. DESARROLLO TEÓRICO.....	22
4.1 TIPOS DE TRATAMIENTOS EN UNA PTAR.....	22
i. Tratamiento físico.....	22
ii. Tratamiento químico.....	23
iii. Tratamiento biológico.....	24
4.2 NIVELES, MÉTODOS Y EQUIPOS MÁS USADOS EN LOS PROCESOS DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL.....	26
4.2.1 Pretratamiento.....	28
4.2.2 Tratamiento primario.....	35
4.2.3 Tratamiento secundario.....	38
4.2.4 Tratamiento terciario.....	66
4.2.5 Tratamiento avanzado.....	70
4.2.6 Manejo de lodos.....	72
4.3 NORMATIVIDAD NACIONAL APLICADA A LOS PARÁMETROS DEL INFLUENTE Y EFLUENTE DE CADA ETAPA DE PTAR.....	82
4.3.1 Normatividad de disposición de lodos aplicada en México.....	83
5. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	85
5.1 DATOS OBTENIDOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL “A”.....	85
6. RESULTADOS.....	94
7. DISCUSIÓN.....	96
8. CONCLUSIONES.....	98
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
10. BIBLIOGRAFÍA.....	102

Índice de tablas

Tabla 1. Concentración de componentes físicos y químicos de las aguas residuales municipales.	16
Tabla 2. Contaminantes comunes en el agua residual y el proceso usado para reducirlos / removerlos.	26
Tabla 3. Principales procesos biológicos utilizados en el tratamiento de agua residual.	40
Tabla 4. Ventajas y desventajas del proceso de tratamiento anaerobio.	55
Tabla 5. Parámetros de procesos de Lodos Activados.	63
Tabla 6. Bases de diseño de un reactor de lodos activados en PTAR A.	64
Tabla 7. Características comunes de los lodos.	73
Tabla 8. Límites máximos permisibles básicos de contaminantes promedio mensual y diario para descarga.	82
Tabla 9. Límites máximos permisibles de contaminantes para agua de reúso.	83
Tabla 10. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos.	83
Tabla 11. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos	83
Tabla 12. Aprovechamiento de biosólidos.	84
Tabla 13. Bases de diseño de caja receptora.	86
Tabla 14. Bases de diseño del pretratamiento.	86
Tabla 15. Bases de diseño del tratamiento primario.	87
Tabla 16. Bases de diseño del tratamiento secundario	88
Tabla 17. Bases de diseño del tratamiento terciario.	89
Tabla 18. Bases de diseño del tratamiento de lodos.	89
Tabla 19. Corrientes de flujo y concentración de parámetros en cada etapa de tratamiento de la Planta de Tratamiento "A".	90
Tabla 20. Concentración de parámetros evaluados en las muestras de agua del influente y efluente en algunas PTAR de México expresado en concentración.	93
Tabla 21. Matriz de combinaciones de niveles y tipos de tratamiento.	94

Índice de Figuras

Figura 1. Sedimentador circular.	22
Figura 2. Sistema de Cloración.	24
Figura 3. Esquema de un reactor biológico secuencial.	25
Figura 4. Tren de tratamiento de Agua Residual Municipal de la PTAR A.	27
Figura 5. Caja de demasías / Obra de demasías.	28
Figura 6. Tipos de cribas utilizadas en el tratamiento de aguas residuales y forma de lavado.	29
Figura 7. Criba gruesa (izquierda) y criba fina estática (derecha).	30
Figura 8. Desarenador tipo vórtice.	31
Figura 9. Esquema del proceso de coagulación-floculación en una planta potabilizadora.	33
Figura 10. Ejemplificación del proceso de coagulación- floculación.	33
Figura 11. Sistema de flotación por aire disuelto.	34
Figura 12. Communitor (a) y Macerador (b) de una PTAR.	35
Figura 13. Criba fina tipo tambor.	36
Figura 14. Esquemas de tanques de sedimentación primaria.	37
Figura 15. Tipos de sistemas de tratamiento secundario.	39
Figura 16. Esquema de corrientes de un tratamiento secundario	42
Figura 17. Interrelación de sólidos en el agua residual.	47
Figura 18. Cono Imhoff con agua residual y sedimentación de lodos	48
Figura 19. Predominancia relativa de microorganismos vs. Características de sedimentación.	49
Figura 20. Balance anaerobio de DQO.	50
Figura 21. Dibujo esquemático de un reactor anaerobio de flujo ascendente.	52
Figura 22. Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente.	52
Figura 23. Secuencia de operación en el reactor anaeróbico por lotes secuencial.	53
Figura 24. Reactor anaeróbico por lotes secuencial.	53
Figura 25. Esquema de reactor anaerobio con deflectores.	53
Figura 26. Reactor anaerobio con deflectores.	54
Figura 27. Reactor de Lecho fluidizado	55
Figura 28. Balance aerobio de DQO.	57
Figura 29. Esquema de un sistema convencional de lodos activados.	60
Figura 30. Reactor Biológico Secuencial.	60
Figura 31. Esquema del proceso en un reactor biológico de membrana aerobio.	61
Figura 32. Reactor biológico de membrana para aguas industriales.	61
Figura 33. Esquema de un biorreactor de lecho móvil.	62
Figura 34. Tipos de lecho móvil.	62
Figura 35. Contactores biológicos rotativos	63
Figura 36. Esquema de un clarificador secundario.	65
Figura 37. Proceso de ozonificación.	67
Figura 38. Equipo de radiación UV.	68
Figura 39. Esquema de filtro de medio convencional.	69
Figura 40. Tipos de filtración y permisibilidad de entrada de sus poros.	70
Figura 41. Esquema de un sistema de ósmosis inversa.	70
Figura 42. Esquema de proceso del intercambio iónico.	71
Figura 43. Proceso del intercambio iónico.	71

Figura 44. Filtro de carbón activado.	72
Figura 45. Lodos producidos en una PTAR.	73
Figura 46. Microorganismos encontrados en los lodos.	74
Figura 47. Esquema de una centrífuga de lodos.	75
Figura 48. Equipo de digestión anaerobia de lodos.	77
Figura 49. Esquema de un filtro prensa de banda.	79
Figura 50. Flujos de tratamiento de lodos y su disposición.	80
Figura 50. Continuación Flujos de tratamiento de lodos y su disposición.	81

Abreviaturas / Símbolos

AOR: Requisito Real de Oxígeno, (*Actual Oxygen Requirement*)
CHS: Carga Hidráulica Superficial
COT: Carbón Orgánico Total
DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxígeno 5
DQO: Demanda Química de Oxígeno
IVL: Índice Volumétrico de Lodo
NO: Nitrógeno Orgánico
NT: Nitrógeno Total
NTK: Nitrógeno Total Kjeldahl
OD: Oxígeno Disuelto
PT: Fosforo Total
PTAR: Planta de Tratamiento de Agua Residual
RAS: Retorno de Lodo activado, (*Return Activated Sludge*)
SDT: Sólidos Disueltos Totales
SOR: Requisitos Estándar de Oxígeno (*Standard Oxygen Requirements*)
SSE: Sólidos (Lodos) Sedimentados
SSF: Sólidos Suspendidos Fijos
SST: Sólidos Suspendidos Totales
SSTLM: Sólidos Suspendidos Totales en el Licor Mezclado
SSV: Sólidos Suspendidos Volátiles
SSVLM: Sólidos Suspendidos Volátiles en el Licor Mezclado
ST: Sólidos Totales
TMRC: Tiempo Medio de retención Celular
TT: Tratamiento Terciario
WAS: Lodo activado de purga, (*Waste Activated Sludge*)
 θ = tiempo de detención en el reactor

C₂H₇NO₂ – Acetato de Amonio

CH₄ – Metano

CO₂ – Dióxido de Carbono

Cu – Cobre

E.coli - Escherichia coli.

H₂O – agua

HCO₃⁻ - ion bicarbonato

N - Nitrógeno

NH₄⁺ - ion amonio

Ni – Níquel

P - Fósforo

UV - Ultravioleta

Zn – Zinc

µm: micrómetros

A: ancho

ft: pies

gpd: galones por día

H: alto

Hm³: Hectómetros cuadrados
lb: libras
kg: kilogramos
L: largo
l: litros
Lps: litros por segundo
meq: miliequivalentes
mg: miligramos
MGD: millones de galones por día
nm: nanómetros
NMP: número más probable
ppm: partes por millón.

RESUMEN

Las plantas de tratamiento de agua residual emplean operaciones y procesos unitarios donde la finalidad es obtener un efluente con las características requeridas para su siguiente uso, este proceso busca la separación de agua- contaminantes, después de haber sido utilizada en diferentes actividades.

La presente investigación muestra una recopilación de información de las variables de diseño general, parámetros indispensables de funcionamiento de los niveles, etapas y equipos usados en el proceso de una Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR). Se desarrollan las etapas que conlleva la disgregación de contaminantes presentes en el agua: pretratamiento, tratamiento primario, secundario, terciario y de los lodos extraídos del agua. Así como los parámetros de diseño de cada etapa, y los que se deben de controlar para su buen funcionamiento.

Se presenta la normatividad aplicable en México para los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y los sistemas de alcantarillado urbano o municipal; los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público; además de especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

La información obtenida de la investigación es comparada con los datos adquiridos de una Planta de Tratamiento de Agua Residual Municipal en funcionamiento, donde se presentan las bases de diseño de los equipos utilizados y las características del influente de cada etapa y efluente final, confirmando lo revisado en la literatura.

1. INTRODUCCIÓN

Derivado del aumento de población, necesidades básicas humanas, procesos industriales, entre otros factores, la sociedad ha propiciado el uso insaciable de agua, el cual es un recurso natural renovable. Dicho de otra forma, el agua es clasificada como aquel recurso que se puede restaurar por procesos naturales a una velocidad superior a la del consumo por los seres humanos, sin embargo, debe ser manejada con cautela para evitar exceder la capacidad regeneradora mundial del mismo.

El crecimiento de la población y los cambios de uso de suelo probablemente aumentarán la presión sobre el suministro y la calidad del agua. Esto, a su vez, requiere un control continuo de las prácticas de protección y gestión de cuencas hidrográficas para apoyar una administración sostenible del agua, como su protección, reducción de desagüe directo a ríos, lagos y océanos, y aumentar las oportunidades de reúso.

Por ello, el Programa Nacional Hídrico (PNH) 2020–2024 (CONAGUA, 2020) manifiesta el valor esencial que tiene el agua como elemento estratégico para atender las necesidades básicas de la población e impulsar el desarrollo de las actividades económicas de nuestro país y del mundo. Se sabe que el agua es la sustancia indispensable para la vida diaria, sin mencionar que está declarada un derecho Constitucional (Art. 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos). Si bien, existe una gran cantidad de ésta en el planeta, no toda puede ser aprovechada para beber o hacer uso común, ya que se necesita de agua dulce.

Como consecuencia del aumento de la necesidad de agua, el mundo ha tenido un incremento en el desabasto de agua dulce, por ello la humanidad ha desarrollado tecnologías para eliminar los contaminantes del agua residual y así poder ser reusada, dando apertura al manejo de Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) (Warkins, 2006). Las plantas de tratamiento pueden presentarse como municipales, industriales e incluso para agua potable.

Uno de los objetivos principales de incentivar la generación de las PTAR, es que el agua tratada pueda ser reusada para satisfacer una necesidad básica y/o solución a la escasez de la sustancia. Según el informe *Wastewater: From Waste to Resource* (Aguas residuales: De residuo a recurso), el tratamiento de las aguas residuales tiene un doble valor. Además de los beneficios medioambientales y para la salud, puede ofrecer frutos económicos al reutilizarse en distintos sectores, ya que los productos derivados, como nutrientes y biogás, pueden aplicarse a la agricultura y utilizarse para la generación de energía. Asimismo, los ingresos adicionales que se obtengan de este proceso pueden ayudar a cubrir costos operativos y de mantenimiento de los servicios (Rodríguez, 2020).

En promedio, los países de ingresos económicamente altos tratan cerca del 70% de las aguas residuales municipales e industriales que generan. Este promedio cae a un 38% en los países de ingresos medios-altos y a un 28% en los países de ingresos medios-bajos. En los países de ingresos bajos solo el 8% recibe algún tratamiento. Estas estimaciones sustentan la aproximación que se cita comúnmente que, en el mundo, más del 80% de las aguas residuales son vertidas sin tratamiento alguno (Ryder, 2017).

Así, el objetivo de este proyecto es recopilar la información bibliografía de los parámetros indispensables en el diseño y funcionamiento de los niveles, etapas y equipos utilizados en una Planta de Tratamiento de Agua Residual Municipal, mientras se desarrolla, describe y analiza cada nivel, etapa y equipo a utilizar durante el tratamiento, de la misma forma que se describen los posibles procesos de tratamiento para los lodos resultantes de la reducción y separación de contaminantes del agua. Esta información servirá de apoyo para entender y comparar con un tren de tratamiento de una Planta en funcionamiento.

Donde, además se presenta las bases de diseño de los equipos presentes en el tren de tratamiento en funcionamiento, así como las características de las corrientes más importantes del proceso para después compararlas con la información bibliográfica.

2. OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS PARTICULARES

2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar una búsqueda sistemática de las variables de diseño general, parámetros indispensables de funcionamiento de los niveles, etapas y equipos usados en el proceso de una Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) para posteriormente ser comparada con datos obtenidos de una planta municipal en funcionamiento.

2.2 OBJETIVOS PARTICULARES.

- Realizar una búsqueda bibliográfica para analizar las características y parámetros del pretratamiento, tratamiento primario, secundario, terciario y de lodos residuales.
- De acuerdo a la información obtenida, definir las características y parámetros de los tipos de tratamiento físico, biológico y químico.
- Caracterizar de forma general el influente y efluente del agua residual en cada etapa que compone una PTAR.
- Describir los equipos y tecnologías que ocupan los niveles de tratamiento ya sea en un solo tipo o en combinación.
- Indicar la normatividad nacional aplicable a la descarga de agua residual tratada en los sistemas de alcantarillado, reúso en servicios al público y, permisibilidad de contaminantes para su aprovechamiento con el fin de compararse con los datos tomados de PTAR "A".
- Comparar con la literatura las bases de diseño, proceso de tratamiento, características de influente y efluente de cada nivel de un tren de tratamiento real y en funcionamiento (PTAR "A").

3. ANTECEDENTES

3.1 DESARROLLOS EN LOS TRATAMIENTOS DE AGUA RESIDUAL.

Se solía decir que "la solución a la contaminación era la dilución". Cuando pequeñas cantidades de agua residual se descargan en un cuerpo de agua que fluye, se produce un proceso natural de auto purificación de la corriente. Sin embargo, las comunidades densamente pobladas generaban cantidades tan grandes de agua residual que la dilución por sí sola no eliminaba la contaminación. Por lo que, fue necesario tratarlas o purificarlas hasta cierto punto antes de desecharlas.

La construcción de plantas centralizadas de tratamiento de agua residual comenzó a fines del siglo XIX y principios del XX primordialmente en el Reino Unido y los Estados Unidos. Con el fin de evitar descargar las aguas residuales directamente en un cuerpo de agua cercano, primero se pasó por una combinación de procesos físicos, biológicos y químicos que eliminan algunos o la mayoría de los contaminantes. También, a partir de la década de 1900, se diseñaron nuevos sistemas de recolección de aguas residuales para separar las pluviales de las residuales domésticas, de modo que las plantas de tratamiento no se sobrecargaran durante los períodos de lluvia.

Después, a mediados del siglo XX, la creciente preocupación pública por la calidad ambiental condujo a una regulación más amplia y estricta de las prácticas de eliminación de agua residual. De hecho, la tecnología empleada en el tratamiento de agua avanzó hasta el punto en que fue posible eliminar prácticamente todos los contaminantes. Sin embargo, esto era altamente costoso que los niveles tan altos de tratamiento generalmente no eran justificados (Lofrano, 2010).

Las PTAR se convirtieron en instalaciones grandes y complejas que requerían cantidades considerables de energía para su funcionamiento. Después del aumento de los precios del petróleo en la década de 1970, la preocupación por la conservación de la energía se convirtió en el factor más importante en el diseño de nuevos sistemas de control de la contaminación. En consecuencia, se optó por el uso de métodos de monitoreo de contaminación de "baja tecnología", que no solo podían ayudar a conservarla, sino que también podrían servir para reciclar nutrientes y reponer los suministros de agua subterránea.

Hoy en día el uso de PTAR se ha extendido a todo el mundo y emplean un sinnúmero de métodos, así como diversas tecnologías. Por ello, el estudio y conocimiento del tratamiento de agua residual posibilita el reúso de este recurso para nuestra y el de las futuras generaciones.

El objetivo final de la gestión de aguas residuales es el control y la regulación de sus diversos flujos. El ciclo de gestión de aguas residuales puede dividirse en cuatro fases básicas interconectadas: 1. Prevención o reducción de la contaminación en la fuente. 2. Recolección y tratamiento de aguas residuales 3. La utilización de aguas residuales como fuente alternativa de agua. 4. La recuperación de subproductos útiles evitando así el vertido de aguas residuales sin tratar o con tratamiento inadecuado con consecuencias que se clasifican en tres grupos, según tengan: i) efectos nocivos para la salud humana; ii) efectos ambientales negativos; iii) repercusiones desfavorables para las actividades económicas (Ryder, 2017).

En México según registros de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2019) cada año se realiza un conteo de las PTAR en operación en el país, con base a ello permiten conocer la cantidad de agua residual tratada. De acuerdo con el Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento de Agua Residual, durante 2015 a nivel nacional, se trató un volumen de 3,516.5 Hm³/año equivalente al 42.8% del volumen de agua residual generada, por lo que se entiende que se registró un volumen de 4,695.0 Hm³/año que se descargó a cuerpos de agua de propiedad nacional sin ningún tratamiento. Mientras al concluir el año 2018 se encontraban registradas 2,540 plantas municipales de tratamiento en operación, con una capacidad total instalada de 181,152.22 L/s, las que daban tratamiento a 137,698.61 L/s, equivalentes al 64.0% del agua residual generada y colectada en los sistemas municipales de alcantarillado del país. Al cierre de 2019 el registro de plantas en operación aumento a 2,642 instalaciones en relación con el año anterior con una capacidad instalada de 194,715.32 L/s y un caudal tratado de 141,479.04 L/s, que significa incrementos que permitieron alcanzar una cobertura nacional de tratamiento de aguas residuales municipales del 65.7% en el ejercicio. No se incluyen las plantas de tratamiento de descargas provenientes de industrias, centros comerciales y hospitales, entre otras de carácter privado.

Mientras en Estados Unidos de América la reutilización del agua tratada va en aumento. La EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, por sus siglas en inglés), ha sugerido pautas para la reutilización de agua tratada. Los usos comunes son: reutilización urbana, reutilización industrial, riego agrícola, embalses de reutilización recreativa y estética, reutilización ambiental para la restauración y mejora del hábitat, recarga de agua subterránea y aumento del suministro de agua portátil (Syed R, 2017).

De acuerdo con la publicación titulada “Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?” (FAO, 2013) comenta que a pesar de que las aguas residuales sin tratar se usan frecuentemente en agricultura en muchos lugares, también es típica la reutilización de efluentes tratados, al menos a un nivel secundario, que puede solucionar problemas de salud pública, con limitaciones apropiadas de uso y medidas preventivas. El efluente tratado a un nivel secundario aún contiene nutrientes de valor para los agricultores, mientras que algunos tratamientos terciarios eliminan el nitrógeno y el fósforo que son ingredientes fundamentales para la fertilización.

Además, una investigación realizada en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en la cual se recolectaron muestras de agua del efluente de una PTAR de origen doméstico con el objetivo de determinar la concentración de metales pesados y evaluar la calidad agrícola del agua residual tratada, dio como resultado del análisis de los elementos: cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn), mostrando que la concentración de estos metales fue baja, por lo que, de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996 el agua residual tratada cumple con la concentración permitida para su descarga en cuerpos receptores. Con ello, los indicadores de salinidad muestran que el agua no es adecuada para la irrigación, es decir, que el agua muestra restricciones de uso por el riesgo de salinidad al aplicarla al riego agrícola (Pérez, 2016). Lo que nos demuestra que, aunque un efluente cumple con las características que la ley gubernamental señala, no quiere decir que es apta para reusarse en cualquier actividad.

Así, el tratamiento de agua residual tiene como resultado una porción de material no deseado, como lo son los contaminantes, sin embargo, este material puede ser usado para obtener beneficios en su tratamiento o reutilización. De la misma forma se realizó una investigación que evaluó el potencial de aprovechamiento de los lodos residuales, como materia prima en la producción de biodiesel. Se seleccionaron lodos provenientes de la PTAR del municipio de Sotaquirá (Boyacá, Colombia) y se les determinó el contenido de sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), concentración de metales pesados, composición química, morfología y microestructura del lodo. Con los resultados obtenidos, los lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas representan una alternativa de materia prima para la extracción de lípidos y ácidos grasos libres en la obtención de biodiésel (Mancipe, 2018).

“La importancia de una calidad en los recursos hídricos para el abastecimiento humano, hace necesaria una revisión global y actualizada de nuestros conocimientos sobre el mundo del agua desde las fuentes de captación y sus problemas asociados hasta la distribución al consumidor” (Doménech, 2002).

3.2 DEFINICIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL MUNICIPAL.

Riffat (2013) describe a las Plantas de Tratamiento de Agua Residual como un conjunto de operaciones y procesos unitarios de origen físico, químico y biológico, o combinación de ellos, que están envueltos por fenómenos de transporte y manejo de fluidos.

El tratamiento de agua residual consiste en la separación de contaminantes que se encuentran agregados al agua luego de ser utilizada en distintas actividades humanas.

A continuación, se presentan fuentes o tipos comunes de aguas residuales:

- Aguas residuales domésticas o municipales: esto incluye las aguas residuales descargadas en residencias o instituciones como escuelas y hospitales, e instalaciones comerciales como restaurantes, centros comerciales, etcétera.
- Aguas residuales industriales: descargas de procesos industriales, como la farmacéutica, procesamiento avícola e industria automotriz.
- Infiltración y afluencia: esto incluye agua que eventualmente ingresa al alcantarillado de desagües de cimientos, tuberías con fugas, pozos de registro sumergidos, e infiltración de aguas subterráneas, entre otros.
- Aguas pluviales: Agua de lluvia y deshielo.

A pesar de las distintas entradas de agua, en todas es indispensable que se lleve a cabo un proceso de tratamiento, con el cual se logra la desinfección y garantiza la calidad para su reutilización o descarga en cuerpos de agua.

Los principales objetivos del tratamiento de agua residual es reducir el nivel de:

- sólidos,
- materia orgánica biodegradable,
- patógenos,
- compuestos tóxicos,

para cumplir con los límites permisibles en las regulaciones que protegen la salud pública y el medio ambiente.

Tabla 1. Concentración de componentes físicos y químicos de las aguas residuales municipales.

Parámetros de Calidad del Agua.	Descripción	Concentración	
		Promedio	Típico
Sólidos Totales (ST), mg/L	Materia suspendida y disuelta, orgánica e inorgánica. Es el residuo que permanece en una cápsula después de evaporar y secar una muestra a una temperatura de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}^a$	400 - 1200	750
Sólidos Suspendidos Totales (SST), mg/L	Los sólidos suspendidos totales en las aguas residuales sin tratar incluyen sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables y no sedimentables (suspendidos).	150 - 400	250
Sólidos en suspensión sedimentables (SS), mL/L	Porción de sólidos orgánicos e inorgánicos que sedimenta en 1 h en cono Imhoff. Estos sólidos son una medida aproximada de los lodos que se eliminan en una cuenca de sedimentación.	5-20	10
mg/L		90 – 260	150
No Sedimentable SS, mg/L	Sólidos coloidales que no se depositan en una cuenca de sedimentación. Se eliminan mediante filtración a través de un filtro de membrana o fibra de vidrio.	65 – 150	100

Parámetros de Calidad del Agua.	Descripción	Concentración	
		Promedio	Típico
Sólidos totales disueltos o filtrables (STD), mg/L	Porción de sólidos orgánicos e inorgánicos que son filtrables. Los sólidos menores de 1 milimicrón (μm) ^c entran en esta categoría.	250 – 700	500
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV), mg/L	Son aquellos sólidos suspendidos que se volatilizan en la calcinación a $550\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, durante 2 horas, el filtro se enfría en un desecador a temperatura ambiente y posteriormente la muestra se pesa, para obtener su concentración se divide el peso entre el volumen de la muestra usada. ^b	90 – 320 ^b	--
DBO ₅ , mg/L	Demanda bioquímica de oxígeno (5 días a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Representa la porción biodegradable del componente orgánico. Es una medida de oxígeno disuelto que requieren los microorganismos para estabilizar la materia orgánica en 5 días a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.	110 – 400	210
DQO, mg/L	Demanda química de oxígeno. Es una medida de materia orgánica y representa la cantidad de oxígeno requerida para oxidar la materia orgánica mediante químicos oxidantes fuertes (dicromato de potasio) en condiciones ácidas.	200 – 780	400
COT, mg/L	El carbono orgánico total es una medida de materia orgánica. El COT se determina convirtiendo el carbono orgánico en dióxido de carbono. Se realiza en un horno de alta temperatura en presencia de un catalizador. El dióxido de carbono se mide cuantitativamente.	80 – 290	150
Nitrógeno Total (NT) ^d , mg/L como N	El nitrógeno total incluye nitrógeno orgánico, amoníaco, nitrito y nitrato. El nitrógeno y el fósforo junto con el carbono y otros oligoelementos sirven como nutrientes. Aceleran el crecimiento de las plantas acuáticas en aguas naturales.	20 – 85	40
Nitrógeno Orgánico (NO), mg/L como N	Se une nitrógeno a proteínas, aminoácidos y urea.	8 – 30	15
Nitrógeno amoniacal (NA), mg/L como N	El nitrógeno amoniacal se produce como primera etapa de descomposición del nitrógeno orgánico.	12 – 50	30
Nitritos y nitratos de nitrógeno, mg/L como N	El nitrito y el nitrato de nitrógeno son las formas más oxidadas del nitrógeno amoniacal. Ambas formas de nitrógeno están ausentes en las aguas residuales domésticas crudas.	0 – pequeño	0
Fosforo Total (PT) ^e , mg/L como P	El fósforo total existe en forma orgánica e inorgánica. El fósforo en el agua natural es una fuente de eutrofización.	4 – 8	6
Orgánico, mg/L como P	El fósforo orgánico está unido a proteínas y aminoácidos.	1 – 3	2
Inorgánico ^f , mg/L como P	La forma inorgánica de fósforo existe como ortofosfato y polifosfato.	3 – 6	4
pH	El pH es una indicación de la naturaleza ácida o básica de las aguas residuales. Una solución es neutra a pH 7.	6.7 – 7.5	7
Alcalinidad, mg/L como CaCO ₃	La alcalinidad en las aguas residuales se debe a la presencia de iones bicarbonato, carbonato e hidróxido.	80 - 350	220
Dureza, mg/L CaCO ₃	La dureza de las aguas residuales se debe principalmente a los iones de calcio y magnesio.	120 – 350	200
Cloruro, mg/L	El cloruro en las aguas residuales proviene del suministro de agua, desechos humanos y ablandadores de agua domésticos.	30 - 100	50

Parámetros de Calidad del Agua.	Descripción	Concentración	
		Promedio	Típico
Grasas y aceites, mg/L	Estos son porciones solubles de materia orgánica en hexano. Sus fuentes principales son las grasas y los aceites que se utilizan en los alimentos.	50 – 150	100
Coliformes Totales, No/ 100 mL.	Organismos aerobios o anaerobios facultativos capaces de crecer a 35 °C en un medio líquido de lactosa, con producción de ácido y gas en un período de 48 h. ^f	10 ⁶ -10 ¹⁰	--
Coliformes Fecales, No/100 mL	Grupo de organismos coliformes que pueden fermentar la lactosa a 44-45 °C. Incluyen bacterias del género Escherichia y también especies de Klebsiella, Enterobacter y Citrobacter. Aunque frecuentemente su origen es fecal.	10 ³ – 10 ⁸	---

^a Fuente: NMX-AA-034-SCFI-2015.

^b Fuente: Metcalf & Eddy, 2003.

^c Micrómetro (μm) = 10^{-6} m (también denominado micrón [μ]). Otras medidas son nanómetros (nm) = 10^{-9} , también denominados milimicrones (m μ); angstrom (\AA) = 10^{-10} m.

^d NT = NO + NA + NO₂-N + NO₃-N. Nitrógeno Kjeldahl total (NKT) = NO + NA.

^e La concentración de fósforo en las aguas residuales municipales en los Estados Unidos de América, en general, ha estado disminuyendo durante la última década. A fines de la década de 1960, las concentraciones típicas de P total en las aguas residuales sin tratar eran de 10 a 12 mg/L.

Actualmente, las concentraciones suelen estar en el rango de 4 a 8 mg/L donde los detergentes a base de fósforo están regulados. Se espera que en el futuro disminuya la concentración de PT en las aguas residuales municipales.

^f Fuente: NMX-AA-042-SCFI-2015

Fuente: Adaptación Qasim & Zhu, (2018).

De acuerdo con los parámetros y componentes mencionados en la Tabla 1, el proceso de remoción de contaminantes se hace progresivamente en los niveles de la planta, en la siguiente sección se presenta las breves definiciones de cada parámetro.

Demanda Química de Oxígeno (DQO), se define como cualquier sustancia tanto orgánica como inorgánica susceptible de ser oxidada, mediante un oxidante fuerte. La cantidad de oxidante consumida se expresa en términos de su equivalencia en oxígeno, expresada en mg/L O₂ (HANNA Instruments, 2020).

La demanda química de oxígeno (DQO) representa la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar la materia orgánica mediante una sustancia química oxidante fuerte en una solución ácida. En general, existe una relación lineal entre los resultados de DQO y DBO₅. Esta relación depende completamente de la composición de las aguas residuales. Las pruebas estándar de oxidación de dicromato de potasio y permanganato de potasio son de uso común (Qasim & Zhu, 2018).

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua en un periodo de 5 días a una temperatura controlada de 20 °C. Se utiliza como medida del potencial de contaminación de las aguas residuales. Nos da una idea de la cantidad de materia orgánica biodegradable que está presente en un agua residual (Riffat, 2013).

Sólidos Suspendidos Totales (SST), es el material constituido por los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos y coloidales que son retenidos por un filtro de

fibra de vidrio con poro de $1.5\mu\text{m}$ secado y llevado a masa constante a una temperatura de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (NMX-AA-034-SCFI-2015).

Sólidos Disueltos Totales (SDT), es el material soluble constituido por materia inorgánica y orgánica que permanece como residuo después de evaporar y secar una muestra previamente filtrada a través de un filtro de fibra de vidrio con poro de $1.5\ \mu\text{m}$ a una temperatura de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (NMX-AA-034-SCFI-2015).

Oxígeno disuelto (OD), Nivel de oxígeno disuelto: la concentración de oxígeno en las aguas residuales determinará las condiciones redox (oxido-reducción) y, en consecuencia, la extensión y tipo de fenómenos redox presentes, tanto en procesos químicos como biológicos (aeróbicos, anóxicos o anaeróbicos) (Barret, 2015).

Fósforo Total (PT), el fósforo es un nutriente esencial para el crecimiento de organismos, por lo que la descarga de fosfatos en cuerpos de aguas puede estimular el crecimiento de macro y microorganismos fotosintéticos en cantidades nocivas. Éstos se clasifican como ortofosfatos, fosfatos condensados y compuestos organofosforados (NMX-AA-029-SCFI-2001).

El fósforo se aporta a las aguas residuales principalmente a partir de desechos humanos y desechos sintéticos como los detergentes. La principal forma de fósforo en las aguas residuales es el ortofosfato, junto con algunos polifosfatos y fósforo unido orgánicamente. El fósforo unido orgánicamente proviene de los desechos del cuerpo y de los alimentos. El fósforo o los ortofosfatos se pueden eliminar de las aguas residuales mediante procesos químicos o biológicos (Riffat, 2013).

Las condiciones operacionales ideales para la remoción de fósforo son:

1. Zona de contacto (microorganismos-alimento) y de fermentación anaerobia con ausencia de aceptores de electrones: oxígeno, NO_3^- , entre otros, para que pueda llevarse a cabo el almacén de ácidos grasos volátiles (AGV) y liberación de fosfatos $(\text{PO}_4)_3^-$ por parte de los microorganismos involucrados.

2. Zona aerobia para la degradación de AGV y recaptura de fósforo a una tasa más alta, evitando la fase endógena o autólisis de las especies bioacumuladoras de poli-P (edad de lodos < 40 días).

3. Tasa de remoción de fósforo en función de la cantidad de DBO de entrada. Dicha tasa de remoción para un sistema de aireación de lodos activados está en el intervalo de 20 a 40 mg de DBO_5 consumidos por mg de P removido.

Una vez que el fósforo es almacenado en el interior de los microorganismos, es muy importante que estos no sean sometidos a condiciones anaerobias o anóxicas para evitar la liberación de fósforo intracelular nuevamente en el seno del líquido.

En base a todo lo anterior se logra la eliminación final del fósforo a través del desecho de lodos (WAS) asegurando como mínimo 4.0% con base a su peso seco.

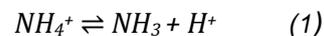
Nitrógenos Totales (NT), corresponden a la suma de los valores de nitratos, nitritos y nitrógeno amoniacal. El gas nitrógeno disuelto en agua no es incluido, ni el nitrógeno orgánico. Todos los componentes individuales deben ser expresados como mg/L N.

El nitrógeno en el medio acuático puede existir en muchas formas. Estas formas son nitrógeno orgánico (unido a proteínas), gas amoníaco disuelto (NH_3) o ion amonio (NH_4^+), nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-) y gas nitrógeno (N_2). El nitrógeno atmosférico (N_2) puede ser fijado por microorganismos en proteínas y la desnitrificación puede provocar la volatilización del N_2 en la atmósfera.

La eliminación de nitrógeno de las aguas residuales es esencial para proteger la calidad de las aguas receptoras y para la reutilización beneficiosa de los efluentes. Los beneficios del proceso biológico sobre los métodos físicos y químicos son (1) menor cantidad de lodo, (2) eliminación mejorada de DBO_5 y SST, y estabilidad y confiabilidad adicionales del proceso, y (3) ahorro de químicos y costos asociados. Es un proceso de dos pasos: nitrificación y desnitrificación (Qasim & Zhu, 2018).

Eliminación biológica de nitrógeno

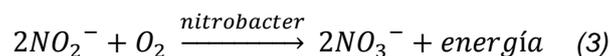
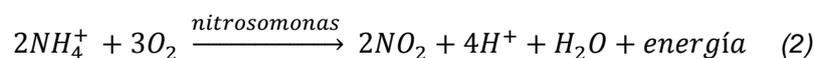
Los compuestos de nitrógeno se forman en las aguas residuales domésticas a partir de la biodegradación de proteínas y urea vertidas en los desechos corporales. Los compuestos de nitrógeno orgánico se convierten adicionalmente en ion amonio acuoso (NH_4^+) o amoníaco libre gaseoso (NH_3). Estas dos especies juntas se denominan amoníaco-nitrógeno ($\text{NH}_4\text{-N}$), y permanecen en equilibrio de acuerdo con la siguiente relación (1):



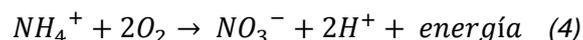
El pH y la temperatura afectan las concentraciones relativas de las dos especies en el agua. La eliminación de amoníaco-nitrógeno o amoníaco del agua se lleva a cabo mediante (a) proceso de nitrificación-desnitrificación biológica, (b) proceso de nitrificación-desnitrificación y (c) proceso de desamonificación.

Estequiometría de nitrificación

La nitrificación es un proceso de dos pasos en el que el amonio se oxida a nitrito (NO_2^-) en el primer paso, y el nitrito se oxida más a nitrato (NO_3^-) en el segundo paso. Las bacterias autótrofas aerobias llevan a cabo estas reacciones como se muestra a continuación (Metcalf & Eddy, 2003):

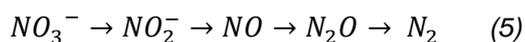


La reacción de oxidación total es



Estequiometría de desnitrificación

El paso final en la eliminación biológica de nitrógeno es la desnitrificación, que implica la reducción del nitrato a óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N_2O) y gas nitrógeno, y se lleva a cabo mediante una variedad de bacterias heterótrofas y autótrofas. En los procesos de aguas residuales, la mayoría son anaerobios facultativos de la especie *Pseudomonas*. La vía metabólica de desnitrificación se puede representar mediante la siguiente ecuación (5):



Nitrógeno total Kjeldahl:

Es definido como la suma del nitrógeno amoniacal y nitrógeno orgánico los cuales son convertidos a sulfato de amonio $[(NH_4)_2SO_4]$, bajo las condiciones de digestión descritas en diferentes métodos.

Bacterias coliformes, es un nombre genérico para una variedad de bacterias que incluye a las coliformes fecales y E. coli, que son bacterias peligrosas que proceden de los excrementos de los animales y los seres humanos, por lo general, a través de sistemas sépticos mal mantenidos o construidos, de grietas en las tuberías de aguas negras o de excrementos de animales en la proximidad de una fuente de agua (COMMUNITY WATER CENTER, 2020).

Presencia de Metales. Los metales en concentraciones traza son indispensables para la actividad microbiana. Sin embargo, en concentraciones mayores de 1 mg/L pueden considerarse como tóxicas al proceso, por ejemplo, Cu, Zn y Ni. La toxicidad de los metales se reduce por la presencia de sulfuros que facilitan su precipitación. Aproximadamente de 1.8 a 2.0 mg/L de metales pesados se precipitan a sulfuros metálicos con 1 mg/L de sulfuro (S^-). El hierro y el aluminio no se consideran tóxicos (CONAGUA, 2019).

Carbono Orgánico Total (COT). El carbono orgánico total es una prueba no específica, es decir, el COT no determinará qué compuestos concretos están presentes (la mayoría de las muestras son mezclas complejas que contienen miles de compuestos de carbono orgánico diferentes). En lugar de ello, informa la suma de todo el carbono orgánico presente en estos compuestos.

La monitorización del carbono orgánico del influente facilita el control de los procesos para maximizar la eficacia de la planta, mientras que la del vertido suele ser un requisito para la descarga en aguas superficiales (HACH, 2015).

Conociendo la tasa de concentración de los contaminantes, se realiza una evaluación del rendimiento en las plantas de tratamiento que genera información de referencia para la descarga en los medios receptores que pueden estar ubicados en cuencas hidrográficas.

4. DESARROLLO TEÓRICO

4.1 TIPOS DE TRATAMIENTOS EN UNA PTAR.

Un sistema de tratamiento de agua residual es una combinación de operaciones y procesos unitarios diseñados para reducir los contaminantes a un nivel aceptable.

Las unidades de tratamiento de aguas residuales para líquidos a granel y lodos generalmente se dividen en: operaciones unitarias y procesos unitarios. En las operaciones unitarias, el tratamiento o remoción de contaminantes es provocado por las fuerzas físicas. En los procesos unitarios, el tratamiento se produce principalmente debido a reacciones químicas y biológicas. A menudo, los términos "operaciones unitarias" y "procesos unitarios" se utilizan indistintamente porque muchos procesos son combinaciones integradas de operaciones que sirven a un único propósito principal (Qasim & Zhu, 2018).

Las aguas residuales pueden tratarse usando uno de los siguientes tratamientos o combinación de ellos, dependiendo de la naturaleza de los contaminantes y el nivel de eliminación deseada.

i. Tratamiento físico

El tratamiento físico involucra la eliminación de contaminantes, principalmente de sólidos en suspensión de las aguas residuales por fuerzas físicas simples, como el proceso de sedimentación, cribado y filtración (Riffat, 2013).

Un ejemplo de los equipos que realizan un proceso de tratamiento físico, son los sedimentadores.

Los sedimentadores hacen uso del proceso de precipitación donde la ocurre el proceso de separación de las fases líquido-sólido en el que las partículas sólidas se dividen del fluido debido a su mayor densidad, sedimentando por gravedad. La Figura 1 muestra un sedimentador circular de una PTAR.



Figura 1. Sedimentador circular.

Fuente: ERAL, 2020

El clarificador contiene una determinada configuración y tiempo de retención de diseño, además en su interior se equipa con un mecanismo estructural que gira a muy baja velocidad a través de un accionamiento central (tornamesa) o perimetral (carro viajero), generando una separación fluido-sólido más eficiente.

ii. Tratamiento químico

El tratamiento químico implica la adición de productos químicos para lograr la conversión o disminución de contaminantes a través de reacciones químicas, como coagulación-floculación para separación de sólidos; desinfección para la depuración de patógenos; o precipitación química para eliminación de fósforo; desinfección química; oxidación química; y neutralización (Riffat, 2013).

Dependiendo del agente químico, se ha observado que la eficiencia de la desinfección está relacionada con su concentración. El efecto de la concentración se maneja empíricamente mediante la siguiente expresión (ecuación 6).

$$C^n t_p = Cte \quad (6)$$

dónde:

C = Concentración del desinfectante

n = Constante

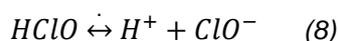
tp = tiempo requerido para inactivar un porcentaje de los microorganismos

El significado físico de esta ecuación puede ser evaluado al graficar en forma logarítmica la concentración del agente y el tiempo requerido para inactivar un porcentaje dado de los microorganismos.

La pendiente de la gráfica corresponde al valor de $-1/n$. Si n es mayor que 1, el tiempo de contacto es más importante que la dosis; si n es igual a 1 el efecto del tiempo y la dosis son iguales (CONAGUA 23, 2019).

El cloro es uno de los agentes desinfectantes más antiguos que se utilizan y es uno de los más seguros y fiables. Tiene propiedades extremadamente buenas. El principal impedimento del cloro es la formación de cloraminas en una reacción con el amoníaco y la formación de ácidos haloacéticos cuando el cloro reacciona con materiales húmicos. El cloro todavía se usa ampliamente como el agente de desinfección primario debido a su bajo costo y efectividad general (Figura 2).

En el agua, sin embargo, forma un compuesto de desinfección de dos niveles a medida que se convierte en una mezcla de equilibrio de cloro, ácido hipocloroso (HClO) y ácido clorhídrico (HCl):



La forma más rentable de desinfectante es la forma HClO (ácido hipocloroso). Especiando las formas ClO^- (ión hipoclorito) y HClO, es posible calcular la dosis requerida de cloro para una desinfección específica basada en el pH (Russell, 2019).

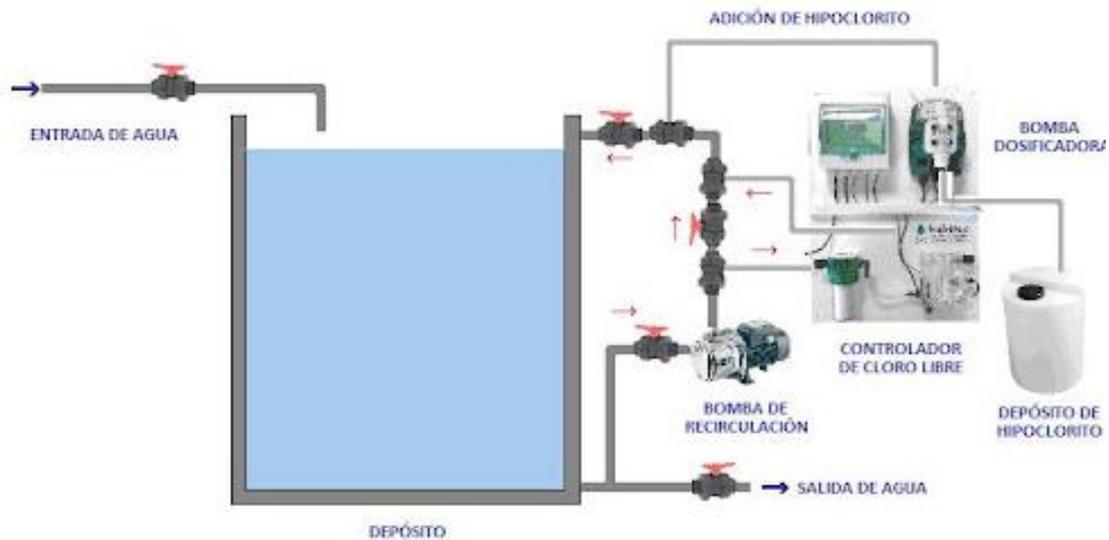


Figura 2. Sistema de Cloración.

Fuente: Hidritec, 2016

iii. Tratamiento biológico

El tratamiento biológico realiza la conversión de contaminantes con la ayuda de microorganismos. Su propósito es reducir la materia orgánica a un nivel aceptable según los límites reglamentarios, y eliminar nutrientes como nitrógeno y fósforo del agua residual. Ejemplos de tratamiento biológico incluyen proceso de lodos activados, biorreactor de membrana, filtro de goteo, entre otros (Riffat, 2013).

Aunque el tratamiento biológico convencional puede eliminar entre un 85% y un 90% de DBO₅ y SST, no logra una eliminación significativa de nitrógeno y fósforo. Los avances recientes en la tecnología de tratamiento de desechos biológicos son capaces de proporcionar una mejor eliminación de nutrientes y orgánicos (Qasim & Zhu, 2018).

Los reactores biológicos secuenciales, también conocido como SBR (*Sequential Biological Reactor*), es un tipo de tratamiento biológico con la característica que utiliza un único depósito para realizar las operaciones habituales de un proceso de lodos activados o los cinco tanques requeridos para llevar a cabo cada una de las fases, además son reactores discontinuos en los que el agua residual se mezcla con un lodo biológico en un medio aireado. El proceso combina en un mismo tanque la reacción, aeración y clarificación permitiendo la reducción de inversión necesaria (CONAGUA 25, 2019).

Los sistemas de reactores discontinuos tienen en común 4 etapas, las cuales se llevan a cabo en secuencia: (1) etapa de llenado, para la adición de sustrato al reactor; (2) etapa de reacción, en la cual el reactor se somete o no a aireación; (3) dependiendo de las necesidades del tratamiento, etapa de sedimentación que permite la separación de sólidos para lograr un sobrenadante clarificado como efluente; (4) y etapa de vaciado, cuyo propósito es la extracción del agua clarificada del reactor. También se puede incluir un paso inactivo para proporcionar flexibilidad a altos flujos (Cárdenas C, 2006), como se muestra en la Figura 3.

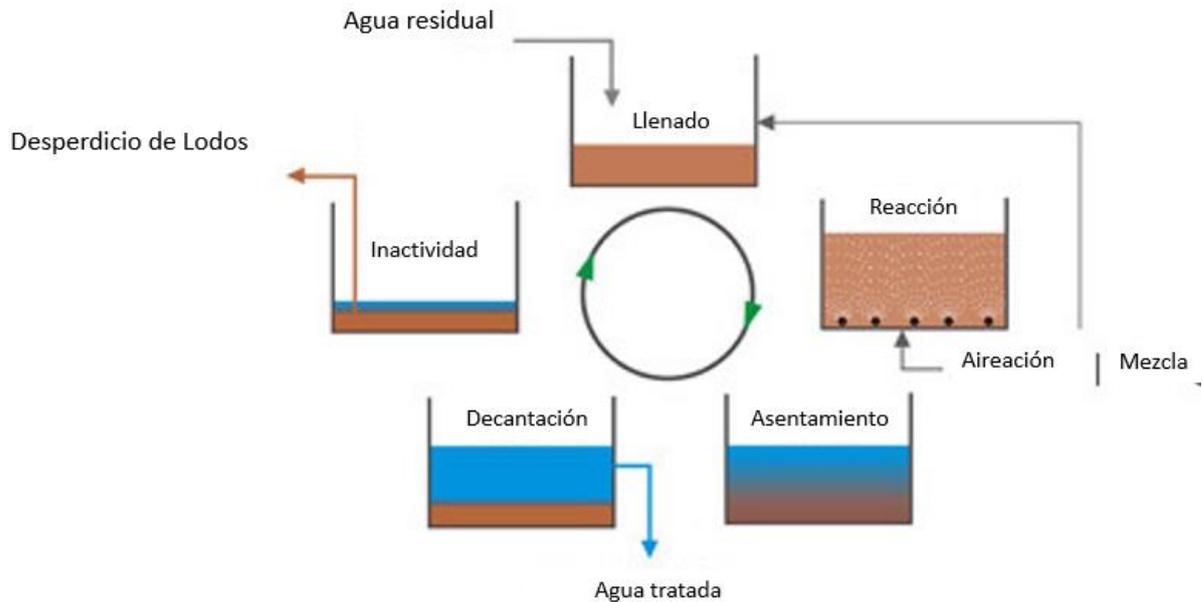


Figura 3. Esquema de un reactor biológico secuencial.

Fuente: IndiaMART, 2021.

El diseño, operación y control de una Planta de Tratamiento de Agua Residual Municipal, tiene un proceso de tratamientos físicos, químicos y biológicos, como se mostró anteriormente. Los ingenieros químicos cuentan con los conocimientos necesarios para poder diseñar, controlar y operar los procesos y parámetros físicos y químicos que se presenten en ellas, como de la temperatura, flujo volumétrico, flujo másico, índice volumétrico de lodos, tiempos de retención, equipos, entre otros. Sin embargo, para el control biológico, será necesario que un profesional de la rama (que cuente con altos conocimientos en microorganismos) sea quién se encargue del área o bien implementar una capacitación adicional al ingeniero.

4.2 NIVELES, MÉTODOS Y EQUIPOS MÁS USADOS EN LOS PROCESOS DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL.

La selección de los procesos de tratamiento de agua residual o la serie de procesos de tratamiento dependen de un cierto número de factores, los que se incluyen (Ramalho, 2003):

- Características del agua residual: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), materia en suspensión, pH, productos tóxicos.
- Calidad del influente.
- Calidad del efluente requerido.
- Costo y disponibilidad de terrenos.
- Consideración de futuras ampliaciones o la previsión de calidad de vertido.

La Tabla 2 muestra los procesos unitarios posibles a llevar a cabo en el tratamiento de agua residual para la remoción de contaminantes presentes en esta, seguido de la Figura 4 que presenta el tren de tratamiento usado en la Planta "A" de la que estaremos refiriéndonos más adelante.

Tabla 2. Contaminantes comunes en el agua residual y el proceso usado para reducirlos / removerlos.

Contaminante	Proceso unitario
Sólidos Suspendidos	Cribas gruesas y finas Cámara de arena Clarificador Filtración Clarificación química mejorada
Sólidos disueltos y coloides	Precipitación química Filtración por membrana Intercambio iónico Adsorción por carbón activado
Orgánicos biodegradables	Procesos de crecimiento suspendido (aeróbico y anaeróbico) Procesos de crecimiento unidos (aeróbico y anaeróbico) Estanques y lagunas Biorreactores con membranas
Patógenos	Cloración Desinfección Ultravioleta Ozonación / Ozonoficación
Nutrientes Nitrógeno	Proceso biológico de nitrificación y desnitrificación (variaciones de película suspendida y fija) Extracción de aire Punto de ruptura de cloración
Fósforo	Remoción biológica de fósforo Precipitación química
Componentes volátiles orgánicos	Adsorción por carbón activado Extracción de aire

Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy, 2003.

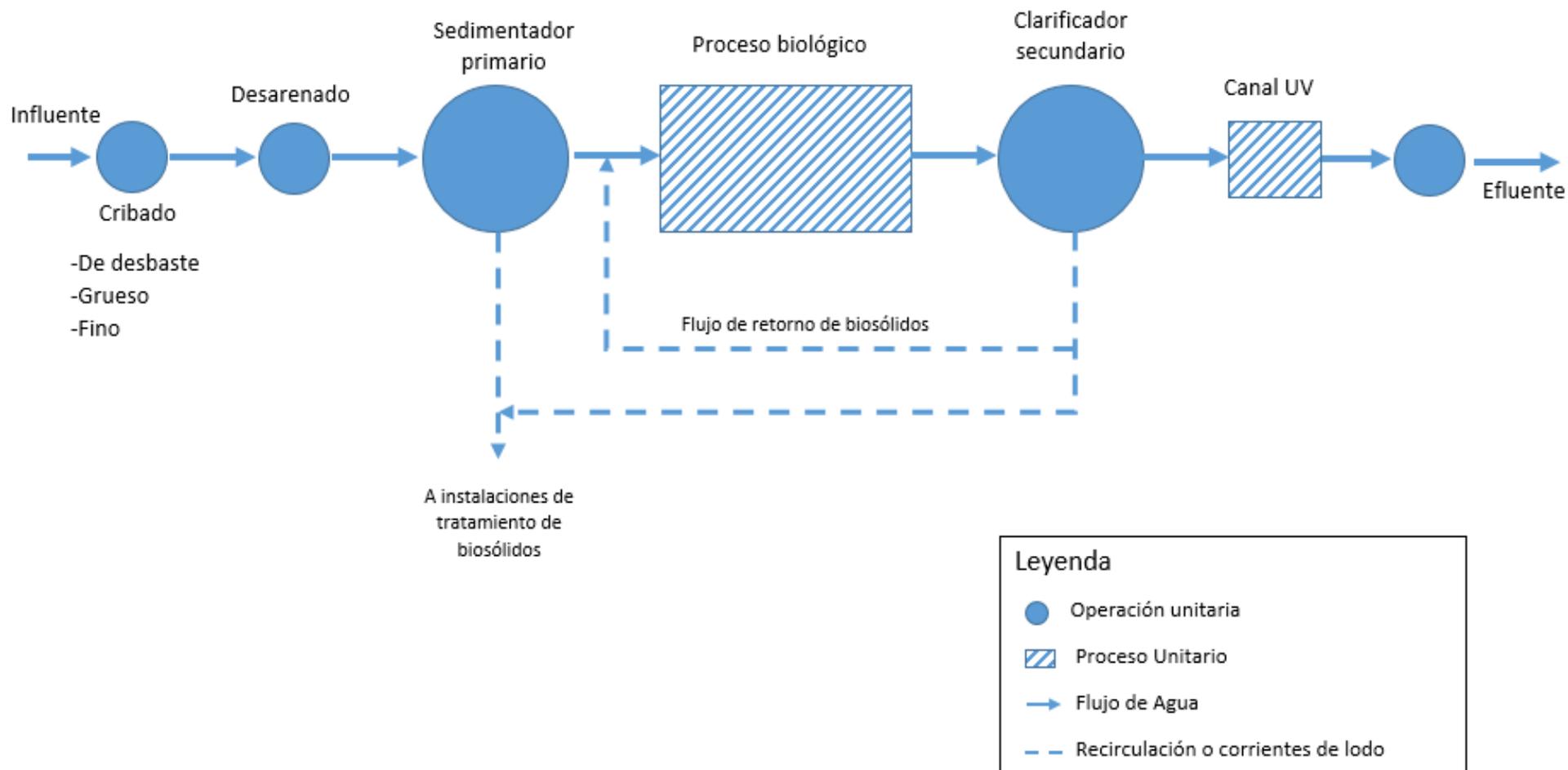


Figura 4. Tren de tratamiento de Agua Residual Municipal de la PTAR A.

Fuente: PTAR A, 2012.

En la siguiente sección se describirán las etapas del tratamiento de agua con algunos de los equipos y los métodos más usados.

El lugar establecido para el ingreso de agua residual a la PTAR es llamado “obra de toma” o “caja de demasías” que deriva el flujo de entrada excedente a la capacidad máxima de la PTAR.

Caja receptora/ Caja demasías

Es una estructura que recibe el agua residual de los colectores, de manera que pueda introducirse a la planta de tratamiento, o derivarla nuevamente al canal vertido (Figura 5).

Generalmente funcionan de manera hidráulica por medio de vertederos o canales derivadores, calculados para el gasto máximo extraordinario de agua residual, trasladándolo hacia un cuerpo receptor fuera de la planta. La operación consiste en controlar los niveles en vertederos de aguja y comprobar visualmente su funcionamiento, cumpliendo con la acción de conducir el excedente de aguas generadas en el sistema de alcantarillado, que por lo general se presentan en época de lluvia.

Además, una caja de demasías es importante, ya que protege el sistema de tratamiento de sobrecarga de contaminantes que afectan la calidad del agua tratada, así como de excesos de flujos que disminuyen los tiempos de retención en las instalaciones y que “lavan” las unidades donde se llevan a cabo los procesos biológicos de tratamiento (CONAGUA 46, 2019).



Figura 5. Caja de demasías / Obra de demasías.

Fuente: JUMAPAC, 2016.

4.2.1 Pretratamiento

El tratamiento preliminar o pretratamiento implica la eliminación de sólidos suspendidos más grandes y materiales inertes del agua residual. Se utilizan procesos de tratamiento físico para eliminar estas partículas y escombros que pueden dañar las bombas y otros equipos, así como para la eliminación de materia inerte antes del tratamiento biológico (Riffat, 2013). Es decir, está destinado a la preparación o acondicionamiento del agua residual con el objetivo específico de proteger las instalaciones, funcionamiento de las obras de tratamiento y eliminar y/o reducir sensiblemente las condiciones indeseables

relacionadas principalmente con la apariencia estética de las plantas. Las operaciones unitarias utilizadas incluyen cribas, molinillos y cámaras de arena.

El tratamiento preliminar también puede incluir coagulación, y flotación para remover partículas y sólidos biológicos presentes en el agua residual.

Algunos de equipos de esta etapa son:

Cribas / Rejillas

Son dispositivos con aberturas, generalmente de tamaño uniforme usadas para la retención de sólidos encontrados en el influente del agua residual a la PTAR. El principal objetivo de las cribas es la remoción de materiales gruesos que puedan dañar los equipos subsecuentes del proceso, reducir la fiabilidad y efectividad del proceso de tratamiento general o contaminar vías fluviales (Metcalf & Eddy, 2003), y algunas de ellas forman figuras para obtener una mayor captación. Su limpieza generalmente es manual para las gruesas y mecánica para las finas.

Clasificación de cribas:

Se utilizan regularmente dos tipos de tamaños: gruesas y finas. Las gruesas tienen aberturas de 6 a 150 mm, mientras las finas tienen aberturas menores a 6 mm.

Las cribas se conforman de barras paralelas, alambre, rejilla, malla de alambre o placa perforada, mientras las aberturas pueden tener cualquier forma, pero generalmente son ranuras circulares o rectangulares.

Como muestra la Figura 6 los sólidos retenidos son llevados por cepillos de limpieza o rastrillos que los conjunta para posteriormente ser lavados (con agua tratada) y ser dispuestos a contenedores.

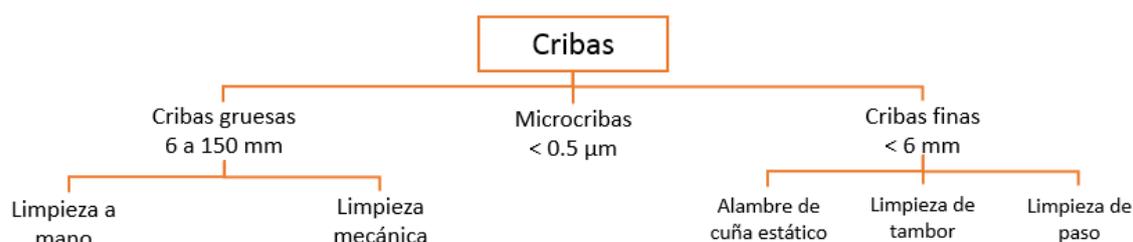


Figura 6. Tipos de cribas utilizadas en el tratamiento de aguas residuales y forma de lavado.

Fuente: Adaptación de Metcalf & Eddy, 2003.

Cribas gruesas. Las rejillas gruesas, normalmente utilizadas como la primera operación unitaria de la planta, quitan los sólidos y basura que de lo contrario podrían dañar o interferir con las operaciones de los equipos de los procesos siguientes en la planta de tratamiento, tales como bombas, válvulas, aireadores mecánicos y filtros biológicos. Se incluyen en la categoría de malla gruesa las rejas de limpieza manual y mecánica, incluyendo bastidores de basura. Las rejillas consisten en barras de acero verticales o inclinadas, espaciadas a intervalos iguales a través de un canal por el que fluye el agua residual. Los criterios utilizados en su diseño incluyen: el tamaño de la barra, el espaciado y el ángulo desde la vertical, así como la anchura del cauce y la velocidad de aproximación de las aguas residuales (Figura 7, derecha) (CONAGUA 26, 2019).

Cribas finas. Las aplicaciones para las cribas finas abarcan amplios usos. Son instaladas en el tratamiento preliminar, seguidas de las cribas gruesas; en el tratamiento primario como sustituto de los clarificadores primarios; y en tratamiento de desbordamientos de alcantarillado combinados (Figura 7, izquierda) (Riffat, 2013).

Los operadores responsables de la eliminación de los tamices generalmente deben mantener un registro de la cantidad de sólidos que se retiran del flujo de agua. Para mantener y obtener registros de detección precisos, se debe determinar el volumen retirado. Se utilizan comúnmente dos métodos para calcularlo (ecuaciones 9 y 10):

$$\text{Remoción de cribas} \left[\frac{m^3}{\text{día}} \right] = \frac{\text{Criba} [m^3]}{\text{día}} \quad (9)$$

$$\text{Remoción de cribas} \left[\frac{m^3}{MG} \right] = \frac{\text{Criba} [m^3]}{\text{Flujo} [MG]} \quad (10)$$



Figura 7. Criba gruesa (izquierda) y criba fina estática (derecha).

Fuente: AQUAMEX, 2020.

Desarenadores.

Es una estructura diseñada para retener la arena, cascara de huevo u otro material del mismo tamaño, con ayuda de la fuerza de gravedad evita que ingresen al siguiente equipo. Los desarenadores se localizan comúnmente después de las cribas gruesas y antes del sedimentador primario. Existen varios tipos de estos, tipo detritus, convencional, flujo vertical, flujo horizontal y tipo vórtice.

Tipo flujo horizontal. En este tipo, el flujo pasa a través de la cámara en una dirección horizontal y la velocidad del flujo en línea recta está controlada por las dimensiones de la unidad, una puerta de distribución del influente y un vertedero en el extremo del efluente (CONAGUA 26, 2019).

Tipo aireado. El tipo aireado consiste en un tanque de aireación de flujo en espiral donde la velocidad es inducida y controlada por las dimensiones del tanque y la cantidad de aire suministrado a la unidad (CONAGUA 26, 2019).

Tipo Vórtice. El tipo de vórtice (Figura 8) consiste en un tanque cilíndrico en el cual el flujo entra en forma tangencial creando un patrón tipo vórtice: las fuerzas centrífugas y gravitacionales hacen que la arena se separe.

Dada la magnitud de la fuerza centrífuga cerca del punto de descarga, algunas de las partículas, de acuerdo con su tamaño, densidad y fuerza de arrastre, son retenidas dentro del vórtice, mientras que otras son arrastradas fuera de la unidad. En decir, la arena se queda en la unidad y las partículas orgánicas salen con el efluente. La arena se extrae por la apertura del fondo de las unidades o bien, se succiona mediante una bomba de aire (CONAGUA 26, 2019).



Figura 8. Desarenador tipo vórtice.

Fuente: IngeCivil, 2020 (izquierda); CALA, 2020 (derecha).

Coagulación y Floculación

La coagulación-floculación es una técnica química de tratamiento de agua que se aplica, típicamente, antes de un proceso físico de separación que suele hacerse por sedimentación o filtración, con el fin de mejorar la capacidad de eliminación de partículas o como etapa posterior a la sedimentación (en plantas de tratamiento de aguas centralizadas).

La coagulación neutraliza cargas y forma una masa gelatinosa que atrapa (o une) partículas, aumentando su tamaño de modo que puede quedar atrapada en el filtro o sedimentar. La floculación mueve suavemente o agita tales partículas, haciendo que se unan formando masas mayores que sedimentan con mayor facilidad o puedan ser filtradas (proceso presentado en la Figura 9 y 10). Estos son relativamente sencillos y rentables, siempre que haya sustancias químicas disponibles y que la dosificación se adapte a la composición del agua. Independientemente de la naturaleza del agua tratada y del sistema integral de tratamiento aplicado, generalmente se incluye el proceso de coagulación-floculación como pretratamiento (por ejemplo, antes de la filtración rápida en arena).

La coagulación y la floculación ocurren en pasos sucesivos destinados a superar las fuerzas que estabilizan las partículas suspendidas, permitiendo su colisión y el crecimiento de masas o flóculos, que luego pueden separarse o eliminarse del agua por medio de la sedimentación o la filtración (Mazille & Spuhler, 2020).

Coagulación

La coagulación es un proceso químico para eliminar la turbidez y el material que produce color, que son principalmente partículas coloidales (1 a 200 μm) como algas, bacterias, sustancias orgánicas e inorgánicas y partículas de arcilla.

En la coagulación del agua residual generalmente se les agrega aluminio o sal de hierro, con y sin polímeros y coagulantes. El proceso es complejo e implica disolución, hidrólisis y polimerización. Los valores de pH juegan un papel importante en la coagulación química dependiendo de la alcalinidad.

La mezcla es una operación importante para el proceso de coagulación. En la práctica, la mezcla rápida proporciona una dispersión completa y uniforme de un producto químico añadido al agua. Luego sigue una mezcla lenta para la floculación (agregación de partículas).

Varios factores afectan el tipo y la cantidad de productos químicos de coagulación necesarios, incluida la naturaleza de los sólidos en suspensión y las características químicas del agua afluente.

Los productos químicos más utilizados como coagulantes son:

- Alumbre (sulfato de aluminio), $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$.
- Cloruro de polialuminio, $\text{Al}(\text{OH})_x(\text{Cl})_y$. Esto es eficiente en algunas aguas, requiere menos ajuste de pH y produce menos lodos.
- Cloruro férrico, FeCl_3 . Esto puede ser más efectivo que el alumbre en algunas aplicaciones.
- Sulfato férrico, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. Es eficaz en algunas aguas y más económico en algunos lugares.
- Los polímeros catiónicos se pueden usar solos como coagulantes primarios o junto con coagulantes de aluminio o hierro.

Aunque el alumbre es, con mucho, el químico coagulante más utilizado, el cloruro o el sulfato férrico forman un flóculo que sedimenta mejor en algunas aguas y pueden ser más consistentes en eliminar la materia orgánica natural en comparación con los coagulantes a base de aluminio.

Además, el cloruro de polialuminio a menudo produce un flóculo de mejor sedimentación en aguas más frías y, da como resultado dosis más bajas, produciendo así menos lodos que los coagulantes férricos y de alumbre.

Floculación

La floculación es la aglomeración de pequeñas partículas y coloides para formar partículas sedimentables o filtrables (flóculos). La floculación comienza inmediatamente después de la desestabilización en la zona de energía de mezcla en descomposición posterior de una mezcla rápida, o como resultado de la turbulencia del flujo de transporte. En algunos casos, esta floculación incidental puede ser un proceso de floculación adecuado. Un proceso de floculación separado se incluye con mayor frecuencia en el tren de tratamiento para mejorar el contacto de las partículas desestabilizadas y construir partículas de flóculos de tamaño, densidad y resistencia óptimos.

El flóculo formado en muchas aguas con alumbre es ligero y frágil además de algo difícil de asentar. Los polímeros y otros aditivos a menudo pueden ayudar a formar un flóculo que se elimina de manera más eficiente mediante la sedimentación y la filtración.

Los aditivos típicos utilizados para coadyuvantes de floculación son:

- Polímeros no iónicos de alto peso molecular
- Sílice activada, sílice amorfa (SiO_2)
- Bentonita

Estos productos químicos se añaden normalmente después de la aplicación de coagulantes, de 5 a 600 segundos posterior de la mezcla. Si el agua que se va a tratar con un coadyuvante floculante ya se encuentra en la etapa de floculación, se debe agregar el producto químico para que pueda esparcirse por el recipiente de floculación.

Porcentaje de remoción alcanzada en el proceso (Qasim & Zhu, 2018):

DBO₅ y DQO = 40-70

SST = 50-80

PT= 70-90

NO = 70-95

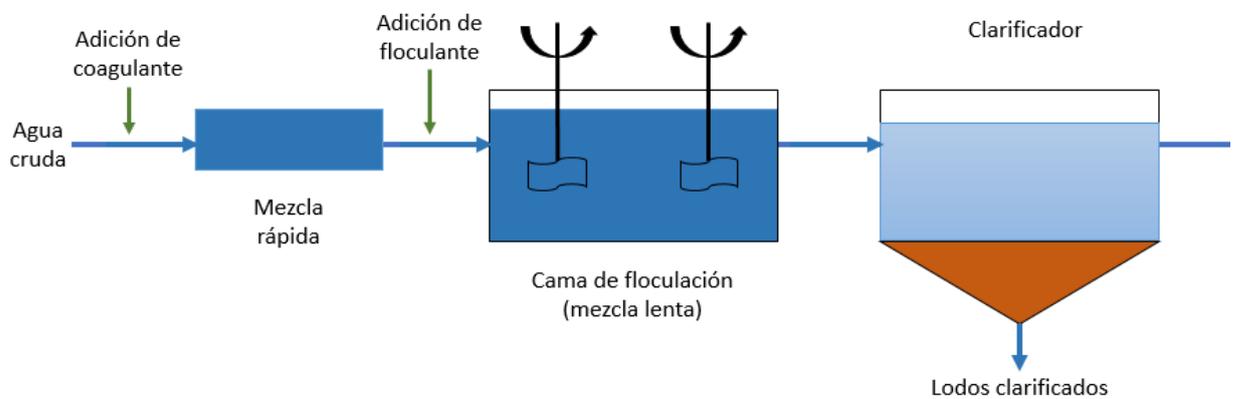


Figura 9. Esquema del proceso de coagulación-floculación en una planta potabilizadora.
Fuente: Mazille & Spuhler, 2020.



Figura 10. Ejemplificación del proceso de coagulación-floculación.
Fuente: BIOQUIMIA, 2022.

Remoción de grasas y aceites

La remoción de grasas y aceites puede llevarse a cabo en sedimentadores primarios y también los sistemas de flotación por aire disuelto son utilizados para este fin.

Sistema de flotación por aire disuelto. El sistema de flotación con aire disuelto (DAF, por sus siglas en inglés), se realiza generando burbujas muy pequeñas con un promedio de diámetro de 20 μm . Estas burbujas se adhieren tanto a los sólidos finos, materia en suspensión, microorganismos, precipitados de grasas y aceites, metales pesados, colorantes, proteínas, elementos orgánicos, levantándolas y haciéndolas flotar en la superficie y permitiendo la clarificación en el fondo del tanque (Figura 11) (CONAGUA 46, 2019).



Figura 11. Sistema de flotación por aire disuelto.

Fuente: CONAGUA 46, 2019.

Tanques de preaireación. La aireación del agua residual antes del tratamiento primario ofrece una modesta remoción de grasa y olores sépticos, esto ocurre en cierto grado de floculación y los sólidos son mantenidos en suspensión uniforme.

Trituradores.

Los trituradores también llamados desmenuzadores consisten en un dispositivo que permite la entrada del agua a unas navajas en movimiento para la trituración primaria del material, reduciendo su tamaño irregular original a dimensiones uniformes. Estos se pueden usar junto con cribas de limpieza mecánica para cortar los sólidos en partículas más pequeñas de tamaño uniforme, que luego se devuelve a la corriente de flujo para pasar al tratamiento siguiente. Según Riffat (2013) existen tres principales tipos de dispositivos de trituración:

Comminutor. se utilizan en pequeñas plantas de tratamiento de aguas residuales, con caudales inferiores a 0.2 m^3/s . Un comminutor típico tiene una pantalla horizontal estacionaria para interceptar el flujo y un brazo giratorio de corte para triturar los sólidos en tamaños que van desde 6 a 20 mm (Figura 12 a).

Macerador. estos son trituradores de baja velocidad que pican o muelen sólidos

a trozos muy pequeños (Figura 12 b). El conjunto de cuchilla maceradora es típicamente entre 6 y 9 mm. La acción efectiva de corte reduce la posibilidad de producir cuerdas de trapos y plásticos que puedan acumularse en equipos siguientes.

Trituradora: las trituradoras de alta velocidad se utilizan para pulverizar sólidos en las aguas residuales. También llamados Hammermills. Los sólidos se pulverizan al pasar a través de un conjunto giratorio de alta velocidad. El agua de lavado se usa para mantener la unidad limpia y el transporte los sólidos de regreso a la corriente de aguas residuales.



Figura 12. Communitor (a) y Macerador (b) de una PTAR.

Fuente: Agua y Ambiente, 2015.

4.2.2 Tratamiento primario

El tratamiento primario consiste en la eliminación física de una porción de los sólidos suspendidos del agua residual, generalmente por sedimentación, a menudo incluye operaciones de tratamiento preliminares.

Tiene como objetivo la remoción por medios físicos o mecánicos de una parte sustancial del material sedimentable flotante, además de una fracción importante de carga orgánica que puede representar entre el 25% y el 40% de la DBO₅ y entre el 50% y el 65% de los sólidos suspendidos.

El tratamiento primario mejorado implica el uso de tratamiento químico para obtener la eliminación de sólidos adicionales en un proceso de sedimentación. La eliminación de sólidos orgánicos más grandes ayuda a reducir la carga en los reactores biológicos secundarios, estos sólidos eliminados se tratan adicionalmente en digestores u otros procesos, y se estabilizan antes de su eliminación.

Cribado fino

Las rejillas finas colocadas en el pretratamiento tienen aberturas de 0.2 a 6 mm y pueden ser rejillas estáticas, tipo escalera, mientras que las rejillas que sustituyen al tratamiento primario tienen abertura de 0.25 a 2.5 mm (Figura 13). La limitante principal de estas unidades es la pérdida de carga, normalmente entre 0.8 y 2 metros.

En los últimos años, la sedimentación primaria ha sido sustituida por las rejillas finas, principalmente las rejillas estáticas de limpieza hidráulica cuyo costo de construcción es

mucho menor, así como el área que se requiere para colocar la unidad también lo es (CONAGUA 46, 2019).



Figura 13. Criba fina tipo tambor.

Fuente: AQUAMEX, 2020.

Sedimentadores

La sedimentación es el término aplicado a la separación por asentamiento de partículas suspendidas que tiene mayor densidad que el agua. Un depósito de sedimentación también puede denominarse tanque de sedimentación, clarificador o depósito de sedimentación, la Figura 14 muestra dos esquemas de un sedimentador, rectangular (superior) y circular (inferior).

Sobre la base de la concentración y la tendencia de las partículas a interactuar, pueden ocurrir cuatro tipos de asentamiento gravitacional: partición discreta, floculenta, impedida (también llamada zona) y compresión. Se estima que la eficiencia de remoción es de 90- 95% de sólidos sedimentables, 50 a 70% de sólidos suspendidos y de 25 a 40% de DBO₅.

Riffat (2013) explica que existen diversos métodos que usan este tratamiento como la flotación, precipitación química, filtros gruesos, oxidación química, coagulación, floculación, sedimentación y filtración, que se pueden concentrar en los cuatro tipos anteriormente dichos:

Tipo I o sedimentación discreta de partículas: La sedimentación tipo I se refiere al asentamiento de partículas discretas en una suspensión diluida, donde su concentración es lo suficientemente baja como para que se depositen como entidades individuales. Este tipo de asentamiento generalmente se observa en cámaras de arena.

Tipo II o asentamiento floculento: se refiere al asentamiento observado en suspensión con partículas que se unen o floculan cuando entran en contacto con otras. La sedimentación tipo II se observa en los clarificadores primarios, en la parte superior de los clarificadores secundarios y también después de la floculación o coagulación en las operaciones de tratamiento de aguas.

Tipo III o asentamiento obstaculizado: también se denomina asentamiento de zona. Se refiere a la sedimentación que ocurre en una suspensión de concentración intermedia, donde las fuerzas entre partículas son suficientes para dificultar la sedimentación de partículas adyacentes. Obstáculos o zonas de asentamiento se observan en clarificadores secundarios.

Tipo IV o asentamiento por compresión: esto ocurre en suspensiones altamente concentradas, donde se forma una estructura debido a la alta concentración, y el asentamiento puede tener lugar solo por compresión de la estructura. A medida que se agregan más partículas a la estructura del líquido, la masa creciente provoca la sedimentación por compresión. Este tipo de sedimentación se observa en la parte inferior de los clarificadores secundarios después de los reactores de lodo activado y también en espesantes sólidos.

Algunos de los parámetros a medir/controlar que tiene un clarificador primario son (Spellman, 2011):

- Porcentaje de remoción
- Tiempo de detención hidráulica
- Tasa de carga superficial
- Tasa de carga de sólidos
- Tasa de desbordamiento del vertedero.
- Porcentaje de sólidos totales (%ST)

Con un porcentaje de remoción alcanzada en el proceso (Qasim & Zhu, 2018):

DBO₅ y DQO = 20-40

SST = 50-70

PT=10-20

NO = 20-30

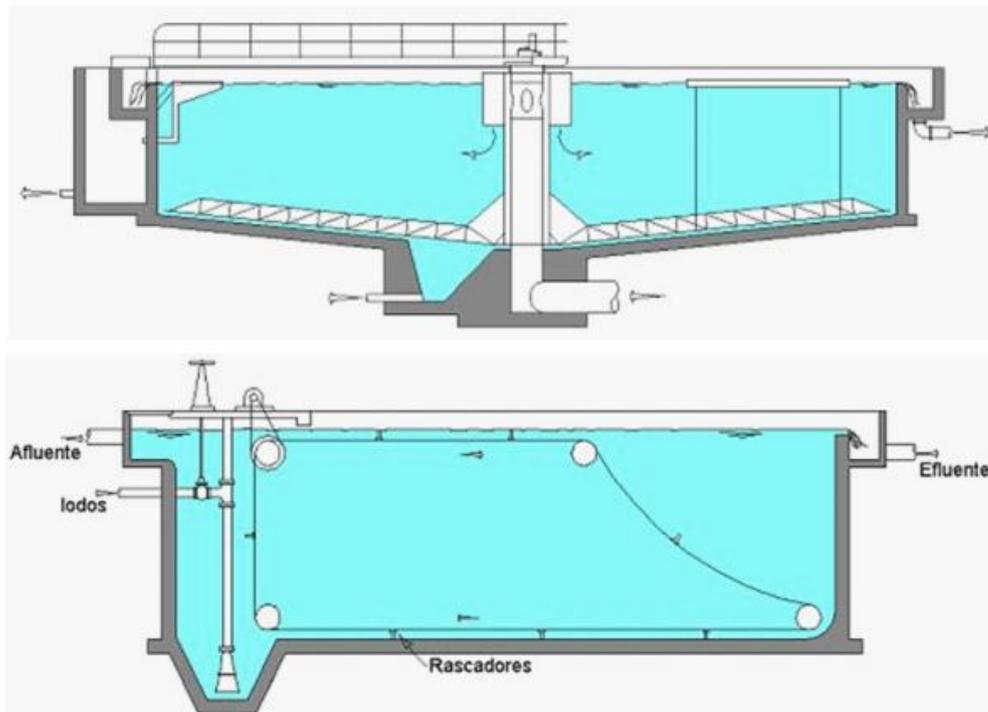


Figura 14. Esquemas de tanques de sedimentación primaria.

Fuente: BELZONA, 2010.

Los lodos, actualmente llamados biosólidos, son el material evacuado del fondo de los tanques de sedimentación primaria. Contienen componentes orgánicos del agua residual, así como muchos tipos de bacterias y microorganismos. El objetivo principal del tratamiento de lodos es reducir el volumen y destruir o estabilizar los sólidos antes de su eliminación final. El proceso incluye espesamiento (concentración), digestión y deshidratación. La eliminación final puede ser a través de incineración, relleno sanitario, uso en fertilización o eliminación en el mar, que se verá en capítulos adelante (BELZONA, 2010).

4.2.3 Tratamiento secundario

El propósito de un tratamiento secundario de aguas residuales es eliminar los orgánicos solubles y los sólidos en suspensión que escapan del tratamiento primario. Estas eliminaciones se logran típicamente mediante procesos de tratamiento biológico (Qasim & Zhu, 2018).

La eficiencia se mide principalmente en términos de DBO_5 y eliminación de sólidos suspendidos. El tratamiento se lleva a cabo en un reactor biológico seguido de un tanque de sedimentación o un clarificador secundario.

Cuando se requiere la nula existencia de algunos nutrientes, como nitrógeno y/o fósforo, se puede integrar o combinar con otros reactores para lograr la disminución de estos a través del proceso de nitrificación-desnitrificación.

Los procesos más utilizados son los lodos activados y filtros percoladores. Existen variedades de procesos biológicos (Figura 15), pero en todas son usadas las lagunas de estabilización y aireaciones. Los tratamientos biológicos de esta categoría tienen una remoción de DBO_5 entre el 85% al 95%, aproximadamente.

Los procesos bioquímicos de tratamiento se clasifican desde tres perspectivas: la primera: transformación bioquímica (remoción de materia orgánica soluble; estabilización de materia orgánica insoluble y conversión de materia inorgánica insoluble); la segunda: ambiente bioquímico, relacionado con los aceptores de electrones (aerobio, anoxico y anaerobio); y la tercera: configuración del reactor, concerniente a la forma en que los microorganismos crecen en el sistema (suspendidos en el líquido sometido a tratamiento o adheridos a un soporte sólido).

En los reactores de crecimiento adherido o biomasa fija, los microorganismos crecen formando una biopelícula sobre un soporte sólido ya sea natural o sintético. Esto significa que los donadores y aceptores de electrones, así como todos los nutrientes, llegan hasta los microorganismos contenidos en la biopelícula por difusión u otros procesos de transporte de masa. Los tres principales reactores de este tipo son los filtros rociadores, discos biológicos rotatorios y los reactores de lecho fluidizado.

Los procesos de biomasa suspendida se caracterizan porque los organismos encargados de la transformación bioquímica de la materia se encuentran dispersos (debido a fuerzas que generan turbulencia y mezcla) en el medio sometido a tratamiento. Los ejemplos más comunes de tratamiento de agua residual con biomasa suspendida son el de lodos activados; lagunas aireadas; reactor anaerobio de mezcla completa; contacto anaerobio y reactor secuencial anaerobio.

En el caso de los lodos activados la incorporación de aire también permite la generación de turbulencia lo que mejora la transferencia de masa y en consecuencia la eficiencia del proceso biológico. Los microorganismos se mantienen con aireación y suspendidos en el reactor, en el cual ocurre la transformación de materia (CONAGUA 25, 2019).

El diseño eficaz y la operación exitosa de los procesos dependen de un conocimiento profundo de los tipos de microorganismos involucrados, los requisitos de crecimiento, la cinética de reacción y los factores ambientales que afectan su desempeño, por lo que se mencionaba que es necesario que este tratamiento debe ser manejado por biólogos y/o expertos. La selección de un proceso en particular debe basarse en estudios a escala de banco y a escala piloto sobre las aguas residuales específicas, investigando los efectos de una variedad de posibles variables (Riffat, 2013).

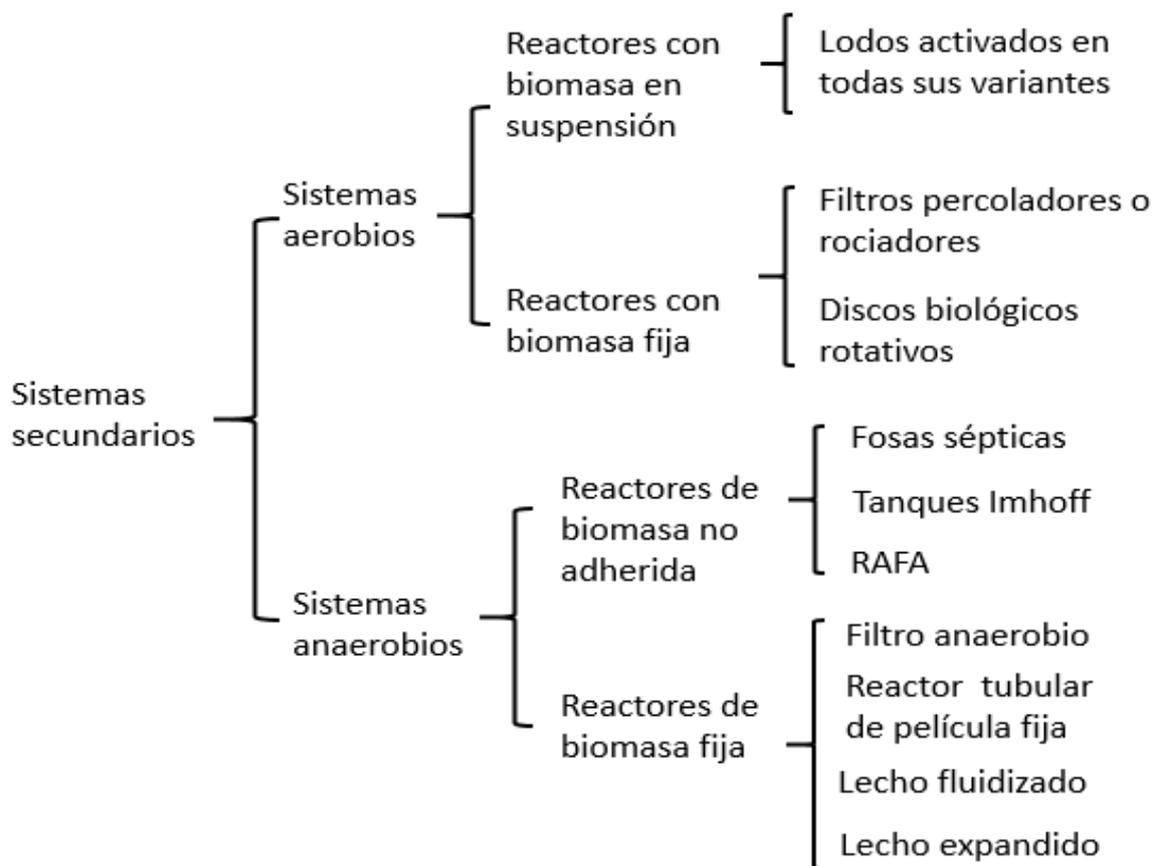


Figura 15. Tipos de sistemas de tratamiento secundario.

RAFA: Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente.

Fuente: De la Vega, 2012.

Los cálculos de control de procesos son una parte importante de las operaciones de tratamiento de agua residual, incluidas las operaciones de estanques. Por lo tanto, siempre que sea posible, se proporcionan ejercicios de control de procesos para mejorar su conocimiento y habilidad, como lo son: área del estanque o reactor, volumen del reactor, flujo, tiempo de retención hidráulica, carga orgánica, recirculación, F/M, MCRT e IVL.

La Tabla 3 divide los tres tipos de procesos en los que se puede llevar a cabo el tratamiento secundario y los contaminantes que se podrán remover durante su uso.

Tabla 3. Principales procesos biológicos utilizados en el tratamiento de agua residual.

Tipo	Nombre común	Uso
Proceso aeróbico		
Crecimiento suspendido	Proceso de Lodos activados Lagunas aireadas Digestión aeróbica	Extracción de DBO, Nitrificación Extracción de DBO, Nitrificación Estabilización, extracción de DBO
Crecimiento adherido	Filtros de goteo Contactores biológicos rotativos Reactores de lecho compacto	Extracción de DBO, Nitrificación Extracción de DBO, Nitrificación Extracción de DBO, Nitrificación
Procesos de crecimiento híbridos (combinados) suspendidos y adjuntos	Filtro percolador / lodo activado	Extracción de DBO, Nitrificación
Proceso anóxico		
Crecimiento suspendido	Desnitrificación de crecimiento suspendido	Desnitrificación
Crecimiento adherido	Desnitrificación de crecimiento adjunto	Desnitrificación
Proceso anaerobio		
Crecimiento suspendido	Procesos de contacto anaeróbico Digestión anaeróbica	Eliminación de DBO carbonosa Estabilización, destrucción de sólidos, eliminación de patógenos
Crecimiento adherido	Lecho fluidizado y empaquetado anaeróbico	Eliminación de DBO carbonosa, estabilización de residuos, desnitrificación
Manto de lodo	Manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente	Eliminación de DBO carbonosa, especialmente residuos de alta resistencia

Fuente: Adaptación Metcalf & Eddy, 2003.

4.2.3.1 Conceptos de diseño, cálculos y definiciones en el tratamiento de secundario.

Para comprender mejor los procesos que se llevan a cabo en una Planta de Tratamiento de Agua Residual Municipal, es necesario mencionar conceptos asociados a éstos, de los cuales se describen a continuación.

Parámetros de diseño para el tratamiento secundario.

Las siguientes son definiciones de parámetros de diseño básicos para reactores de tratamiento biológico:

SSLM: concentración de sólidos suspendidos de licor mezcla en el reactor.

Se mide como la concentración de sólidos suspendidos volátiles (SSV) o sólidos suspendidos totales (SST) en el reactor, expresada como mg/L o kg/m³.

SSVLM (sólidos suspendidos volátiles de licor mezclado o mixto) representa la concentración de biomasa activa en el reactor. La concentración de biomasa activa más los sólidos inertes se llama SSLM. Por lo general, se usa para ambos, y las unidades de medida (SSV o SST) indican la diferencia (Riffat, 2013).

Materia Orgánica

Los componentes principales de las aguas residuales municipales son las proteínas, los carbohidratos y las grasas, que representan el 50%, 40% y 10%, respectivamente. Las proteínas y los carbohidratos son fácilmente biodegradables. Muchos tensoactivos, fenólicos y compuestos orgánicos refractarios resisten la degradación por medios biológicos. Los compuestos orgánicos volátiles (COV) se emiten a la atmósfera, lo que provoca riesgos para la salud y conduce a la formación de oxidantes fotoquímicos (Qasim & Zhu, 2018).

El contenido de materia orgánica en un medio determinado influye en la afinidad de sorción de los compuestos más hidrófobos por ese medio, además de influir en el nivel de actividad biológica. La materia orgánica también sirve como fuente de energía para los microorganismos que son esenciales para la descomposición de algunos productos farmacéuticos biodegradables (Barrett, L, 2015).

F/M: Factor de Carga o Relación alimento/microorganismo

Por F/M (*Food/Mass*, por sus siglas en inglés) es la relación que existe entre la carga orgánica diaria que entra al sistema expresada en kg/día de demanda bioquímica de oxígeno (Kg DBO₅/d) y la masa de lodo activado disponible en el reactor, expresada en kilogramos de masa seca (SSLM).

La relación F/M ayuda al operador a mantener un balance adecuado entre la cantidad de nutrientes disponibles y la cantidad de microorganismos en el reactor aerobio.

La carga orgánica se obtiene del producto de la DBO₅ multiplicada por el flujo diario de agua para tratar:

$$Carga\ Orgánica \left[\frac{kg\ DBO_5}{d} \right] = DBO_5 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * Flujo\ diario \left[\frac{m^3}{d} \right] \quad (11)$$

La cantidad de lodo activado en los reactores se obtiene a partir del volumen y de la concentración de SSLM:

$$Masa\ de\ Lodo\ Activado [kg\ SST] = Volumen\ del\ Reactor [m^3] * SSLM \left[\frac{kg\ SST}{m^3} \right] \quad (12)$$

Utilizando estos cálculos se obtiene la F/M:

$$\frac{F}{M} \left[\frac{kg\ DBO_5}{kg\ SST\ d} \right] = \frac{Carga\ Orgánica}{Volumen\ del\ Tanque * SSLM} \quad (13)$$

Si la carga diaria se proporciona en kg DBO₅/d hablamos de la DBO en la F/M. De lo contrario, en muchos casos se utiliza la demanda química de oxígeno (DQO) y, por lo tanto, la carga orgánica se expresa en kg DQO/d (PTAR A, 2012).

Si la F/M la basamos en SSVLM, entonces opera bajo lo siguiente:

$$\frac{F}{M} \left[\frac{kg\ DBO_5}{kg\ SSV\ d} \right] = \frac{Carga\ Orgánica}{Volumen\ del\ Reactor * SSVLM} \quad (14)$$

La Figura 16 presenta el proceso en el tratamiento secundario (reactor de lodos activados), que muestra los flujos de corriente, tanto volumétrico (Q_n) como másico (M_n), en la entrada, salida y retorno de lodos al reactor y, flujo de salida del clarificador. Así como la cantidad de DBO_5 y SST en cada corriente.

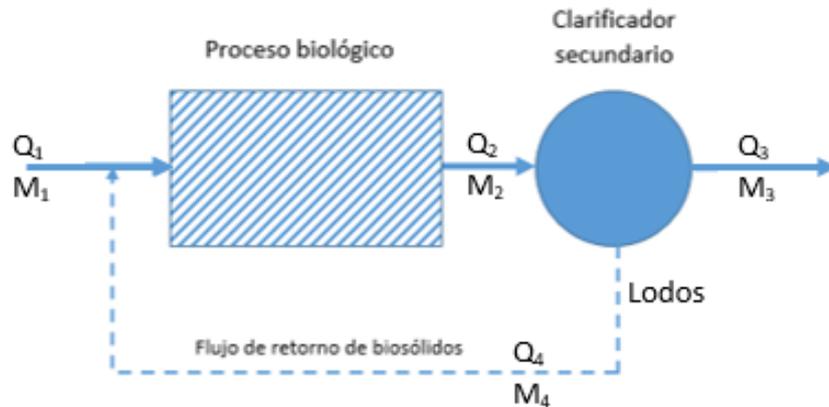


Figura 16. Esquema de corrientes de un tratamiento secundario

Fuente: Adaptado de PTAR A, 2012.

<p>Corriente de entrada al reactor</p> <p>$Q_1 = 32,390.6 \text{ m}^3/\text{d}$ $M_1 = 32,389.6 \text{ Ton/d}$ $DBO_5 = 192.5 \text{ mg/L}$ $SST = 123.8 \text{ mg/L}$</p>	<p>Corriente (licor mezcla) de salida del reactor</p> <p>$Q_2 = 58,310.6 \text{ m}^3/\text{d}$ $M_2 = 58,339.7 \text{ Ton/d}$ $DBO_5 = 1596 \text{ mg/L}$ $SST = 2850.0 \text{ mg/L}$</p>	<p>Corriente de salida del clarificador</p> <p>$Q_3 = 32,390.6 \text{ m}^3/\text{d}$ $M_3 = 32,390.6 \text{ Ton/d}$ $DBO_5 = 20.0 \text{ mg/L}$ $SST = 20.0 \text{ mg/L}$</p>
<p>Corriente de recirculación de lodos (RAS) al reactor</p> <p>$Q_4 = 25,920.0 \text{ m}^3/\text{d}$ $M_4 = 25,920.0 \text{ Ton/d}$ $DBO_5 = 4,788.0$ $SST = 8550.0 \text{ mg/L}$</p>		

Con los datos anteriores se visualiza las diferencias y similitudes de las cantidades de DBO_5 y SST en cada corriente, que permiten obtener la relación F/M anteriormente comentada.

Tiempo Medio de Retención Celular (TMRC) o Tiempo de Retención de sólidos (TRS)

Representa el periodo de tiempo promedio que los lodos o microorganismos han permanecido en el sistema, denominado también como la edad de los sólidos (se habla de esto en el apartado de Microbiología). TMRC es el parámetro más crítico para el diseño de lodos activados, ya que afecta el rendimiento del proceso de tratamiento, el volumen del tanque de aireación, la producción de sedimentos y los requisitos de oxígeno.

EL TMRC se determina con la siguiente ecuación (15):

$$TMRC = \frac{V * SSVLM_R}{Q_p * SSVLM_p + Q_{ef} * SSVLM_{ef}} \quad (15)$$

en donde, V es el volumen del reactor, $SSVLM_R$ es la concentración de SSVLM en el reactor, Q_p es el caudal volumétrico de purga de lodos, $SSVLM_p$ es la concentración de SSVLM en la corriente de purga, Q_{ef} es el caudal volumétrico del efluente y $SSVLM_{ef}$ es la concentración de SSVLM en el efluente (Buitrón, 2018), o bien:

O Bien:

$$TMRC = \frac{SSV \text{ en el lodo de desechos [kg]}}{\text{día}} + \frac{SSV \text{ en el efluente [kg]}}{\text{día}} \quad (16)$$

Para el cálculo de TMRC se usan generalmente los SSV, sin embargo, si es necesario se pueden usar los SST, pero no mezclar los SSTLM y los SSVLM para el cálculo ya que refieren a diferentes sólidos.

El TMRC es un parámetro muy importante para tener en cuenta, tanto en el diseño como en la operación de los sistemas de lodos activos ya que afecta el rendimiento del proceso, el volumen del tanque de aireación, la producción de lodo y los requisitos de oxígeno. En condiciones satisfactorias de operación, cuando el licor mezcla presenta una buena floculación y sedimentación, el valor de SSVLM en el efluente suele ser bajo (con valores típicos inferiores a 15 mg/L) y se controla mediante la purga de lodos.

Para un proceso de aireación en el sistema convencional el TMRC llega a ser hasta de 5 a 20 días y, hasta 30 días en el sistema de aireación extendida.

Hay que considerar que la relación F/M y el TMRC están interrelacionados, esto quiere decir que, cambiando uno se controla el otro. Estos cambian incrementando o disminuyendo la cantidad y calidad de lodo de desecho.

Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)

El tiempo de retención hidráulica, es el tiempo que pasa una partícula de fluido en el reactor, antes de que se descargue (Qasim & Zhu, 2018). Los tiempos de retención varían de acuerdo con el tipo de modificación utilizada y la calidad del agua a tratar. Y se expresa como (ecuación 17):

$$\theta [d] = \frac{V (m^3)}{Q \left(\frac{m^3}{d}\right)} \quad (17)$$

En donde,

θ = tiempo de retención en el reactor

V = volumen del reactor

Q = flujo volumétrico

El tiempo de retención hidráulica y de sólidos es el parámetro fundamental en el diseño de reactores, tanto anaerobios como aerobios, ya que tiene influencia directa en la eficiencia del tratamiento y en la envergadura de la instalación.

La TRH en los reactores de lodos activados convencionales varía de 3 a 8 días. Puede reducirse en procesos de alta velocidad.

Tasa de recirculación

El concepto de recirculación está vinculado a volver a impulsar la circulación de algo adentro de un mismo circuito o sistema. En el caso particular se habla de reúso de lodos secundarios en el reactor aerobio o específicamente de lodos activos.

La recirculación se utiliza para reducir la carga orgánica, mejorar el desprendimiento, disminuir los olores y minimizar o eliminar los problemas de estancamiento. La cantidad de recirculación depende del diseño de la planta de tratamiento y los requisitos operativos del proceso.

El caudal de recirculación de lodos se determina asumiendo una actividad nula y estado estacionario del sistema, es decir que no existe acumulación ni pérdida de lodos (masa biológica) en el mismo. Esto se determina mediante la siguiente expresión, que resulta de realizar un balance de sólidos en el reactor despreciando los SS en el influente bruto:

$$SST_{Reac} * (Q + Q_R) = SST_{Sed} * Q_R \quad (18)$$

En donde,

SST_{Reac} – Sólidos Suspendidos Totales en los reactores, en mg/L

SST_{Sed} – Sólidos Suspendidos Totales en el sedimentador, en mg/L

Q – Caudal afluente a la planta

Q_R – Caudal de recirculación (bombas de recirculación de lodos)

Al cociente

$$\frac{Q}{Q_R} = R \quad (19)$$

Se le identifica como relación de recirculación R, y sustituyendo en la ecuación anterior (19), se llega a la siguiente expresión:

$$\frac{R}{1+R} = \frac{SST_{Reac}}{SST_{Sed}} \quad (20)$$

De donde se despeja el valor de R, la única incógnita de esta ecuación (20). Por tanto, para su determinación es necesario conocer el valor de SST en los reactores y sedimentadores.

El operador de la PTAR debe verificar la tasa de recirculación para asegurarse de que esté dentro de las especificaciones de diseño. Las tasas por encima de las especificaciones indican una sobrecarga hidráulica; las tasas por debajo del diseño indican especificaciones de subcarga hidráulica (OSE, 2012).

La relación de retorno de lodos R_{ras} se determina aproximadamente a partir de la Ecuación 21.

$$R_{ras} = \frac{Q_r}{Q} = \frac{SV}{1000 \frac{mL}{L} - SV} \quad (21)$$

Dónde:

SV = Volumen de sólido sedimentable, mL/L

R_{as} = RAS o flujo recirculado

Retomando la Figura 16, la corriente de lodos activados de retorno (línea punteada), RAS (*return activated sludge*), contiene una alta tasa de DBO₅ y de SST que volverán para ser utilizados en el reactor y ayudar a mantener una alta concentración de biomasa activa en el tanque de aireación.

pH

Un rango de pH apropiado debe mantenerse en el tanque de aeración para que el sistema funcione adecuadamente. En forma general se requiere neutralizar cuando el agua residual en el tanque de aeración esté fuera de rango. Rango óptimo 6.5 a 8.5. (Ramírez E., s.f.).

La temperatura

La temperatura de las aguas residuales municipales es ligeramente superior a la del suministro de agua y se mantiene en el rango de 10 a 21 °C. La temperatura de las aguas residuales tiene un efecto significativo sobre la actividad microbiológica, la tratabilidad, la solubilidad de los gases, la densidad y la viscosidad (Qasim & Zhu, 2018).

Parámetros de diseño y operación para clarificadores.

Capa de lodo

La profundidad de la manta de lodo en el clarificador final indica la profundidad de la zona de espesamiento y la masa aproximada de sólidos retenidos en este. El operador de la planta mide la profundidad de la capa de lodo mediante un dispositivo de muestreo llamado juez de lodos. Está diseñado para medir la profundidad precisa de los sólidos sedimentados hasta una concentración del 5% (Qasim & Zhu, 2018).

Volumen de lodo sedimentado

Un método rápido para determinar la relación de lodo de retorno (Q_r / Q) es sedimentar el licor mezclado durante 30 minutos en una probeta graduada de 1 L (Qasim & Zhu, 2018).

Carga Hidráulica Superficial (CHS)

La CONAGUA (2019) describe a la carga superficial como el parámetro más importante en los sedimentadores, la carga superficial es una medida del gasto en relación con el área de superficie total disponible para el proceso y se expresa como metros cúbicos por día por metro cuadrado de área de superficie del tanque, como se muestra en la siguiente ecuación (22).

$$CHS \left[\frac{m^3}{m^2 d} \right] = \frac{\text{Gasto o flujo (incluye la recirculación)} \left(\frac{m^3}{d} \right)}{\text{área del Tanque o superficie superior} (m^2)} \quad (22)$$

Un tiempo de retención más largo y una menor carga superficial implican mayor eficiencia de remoción de sólidos. Si son demasiado largos y bajos, pueden ocurrir condiciones sépticas en el agua y tener problemas de flotación de lodos y malos olores.

La CHS se puede utilizar para comparar las condiciones reales con el diseño de las plantas que, generalmente usan una tasa de carga superficial de 1 a 5 $m^3/d m^2$.

Otros términos usados como sinónimos de CHS son, tasa de desbordamiento de superficie y tasa de sedimentación de superficie.

Tasa de desbordamiento.

La tasa de desbordamiento del vertedero (tasa de carga del vertedero) es la cantidad de agua que sale del tanque de sedimentación por pie lineal de vertedero. El resultado

de este cálculo se puede comparar con la base del diseño. Normalmente, en el diseño de un tanque de sedimentación se utilizan tasas de desbordamiento de vertedero de 1.89 a 3.97 m³/h m (Spellman, 2011).

$$\text{Tasa de desbordamiento} = \frac{Q \left(\frac{m^3}{d} \right)}{\text{Logitud del vertedero (m lineales)}} \quad (23)$$

Carga de Sólidos

La carga de sólidos describe cuantos kilogramos por día de sólidos entran al sedimentador por cada metro cuadrado de área. Se calcula de la siguiente forma (ecuación 24):

$$\text{Carga de Sólidos} \left[\frac{kg}{m^2} \right] = \frac{\text{Sólidos en el clarificador}}{\text{Área de la superficie}} \quad (24)$$

Parámetros de operación de PTAR Municipal los lodos

El Índice Volumétrico de Lodos IVL (Prueba de sedimentación)

La prueba estándar para medir la capacidad de sedimentación de los sólidos del agua residual es la determinación del Índice Volumétrico de Lodos (IVL). Es una medida que se usa para caracterizar la facilidad con la que los sólidos se depositan y es la relación entre volumen de lodo y el contenido de sólidos suspendidos totales (mL/g), típicamente en 30 minutos. El IVL debe estar generalmente entre 60 y 120 mL/g, se calcula con la siguiente ecuación (25):

$$IVL \left[\frac{mL}{g} \right] = \frac{V_{\text{muestra sedimentada}} \left[\frac{mL}{L} \right]}{ST_{\text{muestra}} \left[\frac{mg}{L} \right]} * 1000 \frac{mg}{g} \quad (25)$$

en donde, $V_{\text{MUESTRA SEDIMENTADA}}$ es el volumen de sólidos sedimentados en una muestra de un litro después de un tiempo determinado y ST_{MUESTRA} es la concentración de sólidos suspendidos en la muestra inicial.

O bien:

$$IVL = \frac{SSE}{SSTLM} * 1000 \quad (26)$$

Donde SSE es el volumen de lodo sedimentado en una probeta de un litro después de 30 minutos, dividido entre SSTLM, la concentración de sólidos suspendidos totales en el licor mezclado y el resultado multiplicado por 1000.

La prueba de sedimentación, según el programa “Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento en Zonas Urbanas” (APAZU) es un indicador para estimar la calidad de lodo, la información de esta prueba puede informar los cambios necesarios en el sistema y poder realizarlos con tiempo para prevenir situaciones de problemas recurrentes.

Los signos visuales que se deben observar en esta prueba en el flóculo y formación de lodo son:

- a) Si el flóculo es granular, compacto, esponjoso o ligero,
- b) Si el flóculo sedimenta individualmente o primero forma un manto,
- c) Si el manto de lodo es:

- Rasgado y aterronado, o uniforme sobre la superficie,
- Sedimenta ligeramente,
- Captura la mayoría del material en el agua residual conforme se sedimenta,
- Si el lodo es de color café y el sobrenadante es de color oro claro.

Calidad del lodo activado

Las características de sedimentación del lodo activado es el parámetro más importante a considerar cuando se diseña el clarificador o sedimentador secundario. El clarificador se debe diseñar para permitir una separación perfecta del agua tratada y el lodo activado. Si las características del lodo no se conocen, el diseño del sedimentador puede quedar en condiciones diferentes a las requeridas (Ramírez E., s.f.).

Sólidos en el agua residual

El agua residual contiene una alta diversidad de materiales sólidos que varían desde trapos hasta materiales coloidales.

La prueba estándar para sólidos sedimentables consiste en colocar una muestra de agua residual en un cono Imhoff de 1 litro (Figura 18) y anotar el volumen de sólidos en milímetros que se depositan después de un período de tiempo específico (1 h). Por lo general, alrededor del 60 % de los sólidos en suspensión del agua residual municipal se pueden asentar. Los sólidos totales (ST) se obtienen evaporando una muestra de agua residual hasta secarse y midiendo la masa del residuo. Se utiliza una etapa de filtración para separar el total de sólidos suspendidos (SST) del total de sólidos disueltos. La Figura 17 muestra la variedad de sólidos filtrables que comprende la prueba.

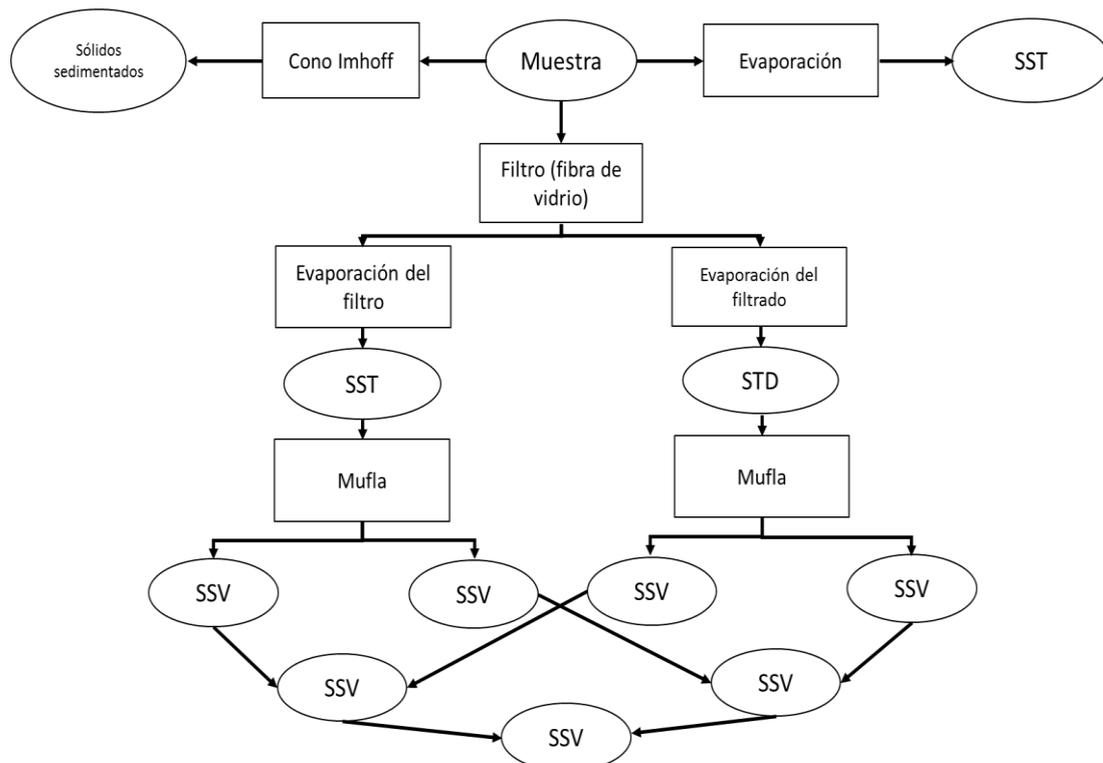


Figura 17. Interrelación de sólidos en el agua residual.

ST: Sólidos Totales; SST: Sólidos Suspendidos Totales; SSV: Sólidos Suspendidos Volátiles; STD: Sólidos Disueltos Totales; SSF: Sólidos Suspendidos Fijos; SDV: Sólidos Disueltos Volátiles; SDF: Sólidos Disueltos Fijos; SVT: Sólidos Volátiles Totales; SFT: Sólidos Fijos Totales (Fuente: Metcalf & Eddy, 2003).



Figura 18. Cono Imhoff con agua residual y sedimentación de lodos

Fuente: Ripley E, 2013.

Microbiología

Los lodos biológicos pueden contener bacterias de los géneros *Pseudomonas*, *Zooglea*, *Achromobacter*, *Flavobacterium*, *Nocardia*, *Bdellovibrio*, *Mycobacterium*, *Nitrosomonas*, *Nitrobacter*, entre otros.

También es de importancia la presencia de microorganismos pulidores del proceso, dentro de esta categoría se encuentran; los protozoarios, encargados de consumir bacterias dispersas que no han formado flóculos, y los rotíferos, que consumen partículas orgánicas pequeñas que no han sedimentado en el clarificador.

La Figura 19 muestra el dominio relativo de los microorganismos más comunes en el agua residual de acuerdo con las características de sedimentación del lodo, la distribución está asociada también a su edad. Haciendo referencia a los flóculos dispersos, las columnas de la izquierda corresponden a un lodo joven en el cual los flóculos son muy pequeños o inexistentes ya que tienen mayor abundancia de organismos libres que no se agrupan, las columnas de la derecha corresponden a lodos con alta edad donde hay una predominancia de bacteriófagos y, por lo tanto, los flóculos son pequeños, además de que, ante la poca cantidad de alimento para cada microorganismo, los flóculos se encuentran estabilizados sin requerir digestión posterior; la columna del centro corresponde a un lodo de edad madura que habita en un sistema estable y donde se ha generado una diversidad importante de microorganismos y, por lo tanto, se pueden formar consorcios (flóculos) fácilmente. Esta riqueza de microorganismos está asociada con la curva de crecimiento logarítmico y mantiene estrecha relación con el F/M, y se interpreta a partir de donde la curva empieza a tener un crecimiento acelerado con valores de F/M altas, que se caracteriza por lodos jóvenes con una alta tasa de reproducción, continúa incrementándose la curva, hasta llegar a la fase estacionaria que se relaciona con F/M del orden de 0.2 a 0.3, dentro de esta categoría se tienen las mejores características de sedimentación y con una tasa de

reproducción aún alta. Conforme la curva continúa, decrece y sigue descendiendo hasta el punto donde la tasa de reproducción es menor, e inclusive la tasa de mortandad incrementa ante la limitante de sustrato o alimento, para los microorganismos esto está estrechamente relacionado un F/M muy bajo y altos tiempos de retención celular (PTAR M, 2006).

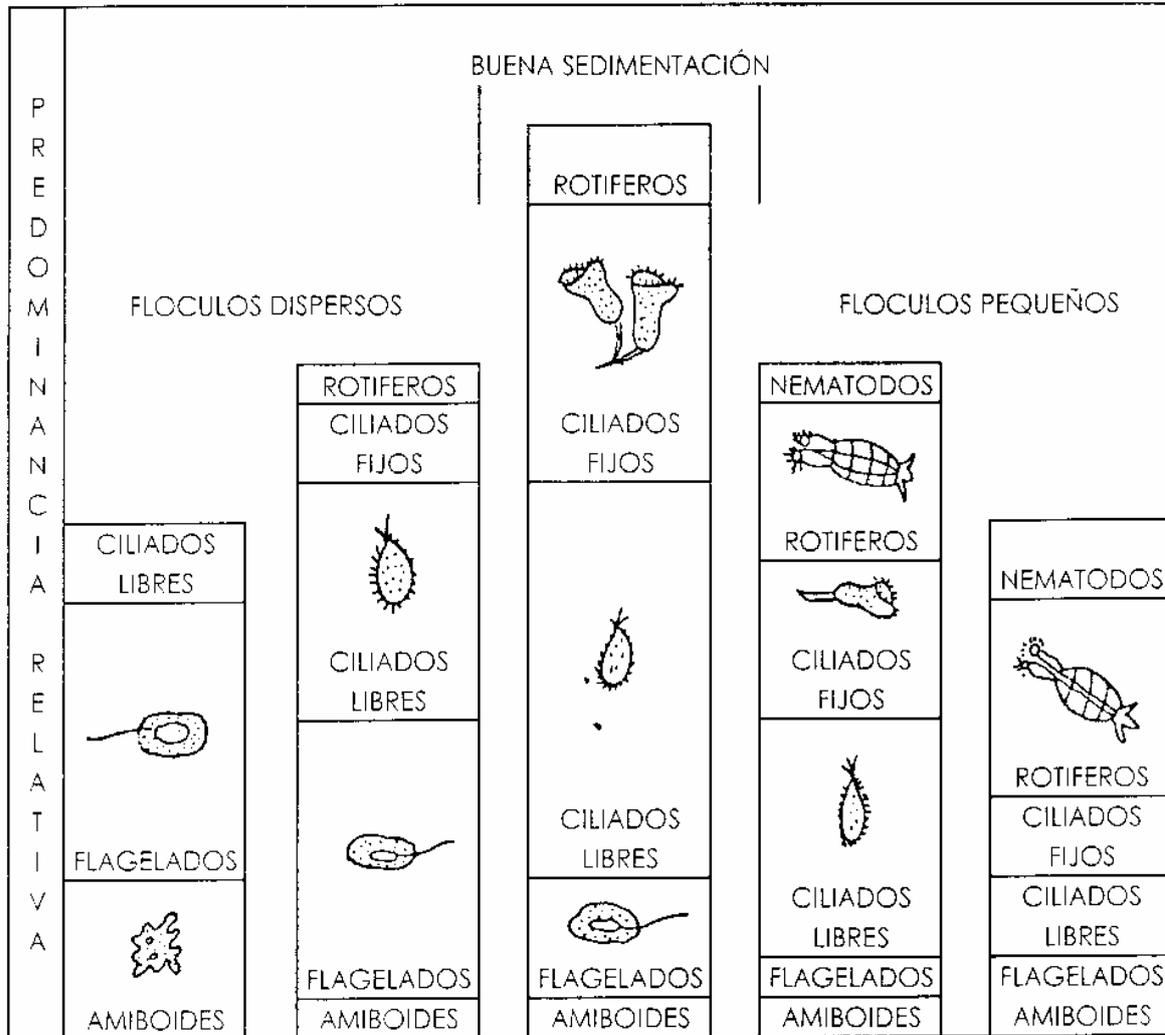


Figura 19. Predominancia relativa de microorganismos vs. Características de sedimentación.

Fuente: PTAR M, 2006.

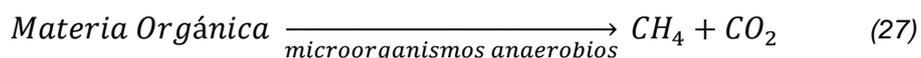
4.2.3.2 Sistemas anaerobios y aerobios.

El agua residual procedente del tratamiento primario, por gravedad pasa a un canal de mezcla situado al inicio de cada bioselector, en este canal se unen el agua residual cribada y la corriente de recirculación de lodos de los clarificadores. La combinación de ambos fluidos es mejor conocida como licor de mezcla e inmediatamente pasa por gravedad al bioselector.

Bioselectores: Un aspecto importante que ocurre en esta etapa es el efecto mismo de selección del proceso. Muchos organismos filamentosos en lodos activados son aeróbicos, entonces, en este ocurre el proceso de selección basado solamente en la rápida habilidad para absorber y almacenar el substrato. Este tipo de selección se denomina “cinética” (PTAR M, 2006).

Sistemas de tratamiento anaeróbicos.

La Digestión Anaerobia (DA) es el proceso fermentativo que ocurre en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales. El proceso se caracteriza por la conversión de la materia orgánica a biogás, metano (CH_4) y CO_2 , en ausencia de oxígeno y con la interacción de diferentes poblaciones bacterianas (Rodríguez A., 2020). La tasa de conversión de carbono orgánico en el proceso de DA es directamente proporcional al rendimiento de biogás en condiciones de buen funcionamiento. Un biogás típico contiene 50 a 70% de CH_4 , 30 a 50% de CO_2 y con cantidades muy pequeñas de hidrógeno (H_2) y otros gases. (Mannina G. *et al.*, 2018).



La digestión anaerobia es un proceso de transformación de la materia orgánica, como no hay presencia de un oxidante en el proceso, la capacidad de transferencia de electrones de la materia orgánica permanece intacta en el metano producido. En vista de que no hay oxidación, la DQO teórica del metano equivale a la mayor parte de la DQO de la materia orgánica digerida (90 a 97%), mientras es mínima la parte convertida en lodo (3 a 10%) (Figura 20). En las reacciones bioquímicas, solo una pequeña parte de la energía es liberada (Rodríguez A., 2020).

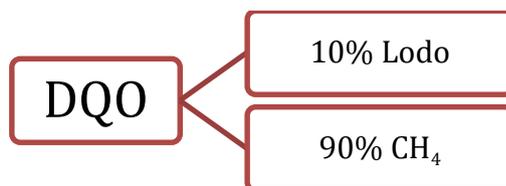


Figura 20. Balance anaerobio de DQO.

Los procesos de degradación anaerobia se usan principalmente en el tratamiento de lodos residuales y descargas con alta carga contaminante. Para el caso de tratar aguas residuales con alto contenido de materia orgánica, los procesos anaerobios han demostrado tener más ventaja que los aerobios (Malina y Pohland, 1992).

La descomposición anaeróbica involucra a un consorcio de microorganismos que ejecutan un proceso complejo en una serie de pasos interdependientes. En general, las reacciones bioquímicas anaeróbicas implican tres pasos básicos:

(1) hidrólisis, (2) acidogénesis (fermentación) / acetogénesis y (3) metanogénesis (Qasim & Zhu, 2018).

Como cualquier proceso es susceptible a un cierto número de factores que pueden alterar la estabilidad y la eficiencia de este, los más importantes parámetros que influyen en la degradación anaeróbica de la materia orgánica se presentan a continuación (Lomelí, 2011):

- Temperatura
- pH y Alcalinidad
- Agitación
- Sustancias tóxicas e inhibidores

Los principales tipos de procesos de tratamiento anaeróbico de crecimiento suspendido son (1) digestión anaeróbica, (2) proceso de contacto anaeróbico (*AnCP*, por sus siglas en inglés), (3) proceso de manto de lodo anaeróbico de flujo ascendente (*UASB*, por sus siglas en inglés) y (4) reactor discontinuo de secuenciación anaeróbica (*AnSBR*, por sus siglas en inglés) (Qasim & Zhu, 2018).

Basado en un proceso biológico, controlado bajo condiciones anaerobias que trata efectivamente la DQO, DBO y SSV produciendo biogás, calor y poca biomasa (sin oxígeno), se utilizan procesos como:

Sistema anaeróbico de flujo ascendente de manto de lodo. El reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA o UASB por sus siglas en inglés) es un proceso de un solo tanque.

En el RAFA (Figura 21 y 22), el agua residual a tratar es conducida desde la parte superior del reactor hacia el fondo de este, por medio de un sistema de tuberías. El influente fluye en sentido ascendente a través de un manto de lodos (microorganismos anaerobios) llevándose a cabo de esta forma el tratamiento del agua residual. El biogás producido, genera una circulación interior (mezclado). El biogás, el lodo y el líquido tratado ascienden a la parte superior del reactor, en donde entran en contacto con deflectores que permiten la separación del biogás y la sedimentación del lodo. El biogás es capturado por la campana de recolección que se encuentra en la parte superior del reactor y por lo tanto el líquido tratado (efluente) sale igualmente por la parte superior (CONAGUA, 2016).

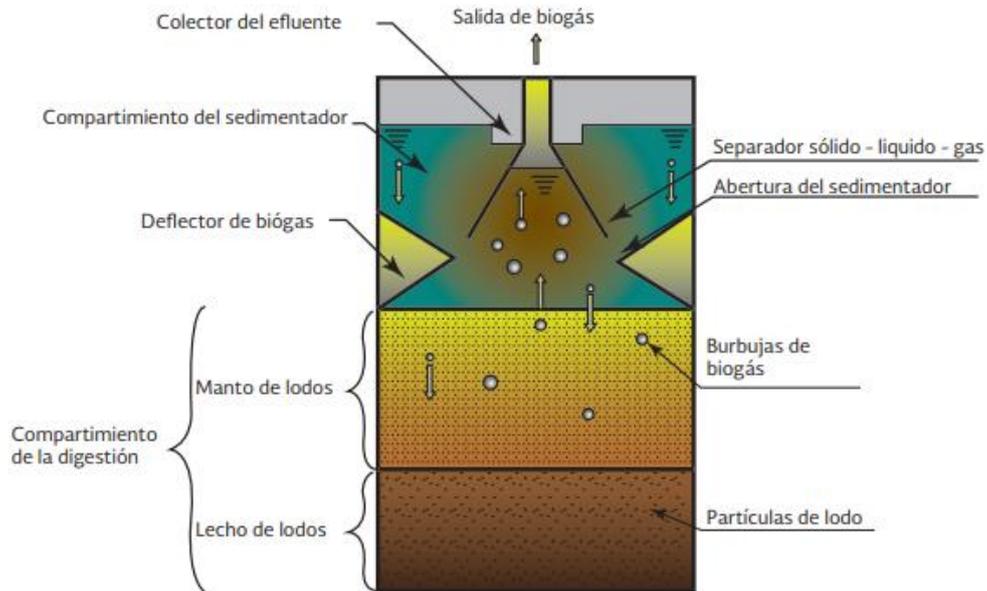


Figura 21. Dibujo esquemático de un reactor anaerobio de flujo ascendente.
Fuente: CONAGUA 49, 2019.



Figura 22. Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente.
Fuente: ETW International, 2020.

Reactor anaerobio por lotes en serie (ASBR, por sus siglas en inglés). También llamado reactor discontinuo de secuenciación anaeróbica (Figura 23 y 24), tiene un proceso de crecimiento en suspensión donde las conversiones biológicas y la separación de sólidos líquidos tienen lugar en el mismo reactor. Una de las ventajas del proceso es la formación de un lodo granular denso que tiene una alta actividad y se deposita bien. Tanto la alimentación como la decantación tienen lugar por lotes en series discontinuas en un único reactor. La secuencia cíclica incluye cuatro etapas: alimentación, reacción, sedimentación y vaciado (Riffat, 2013):

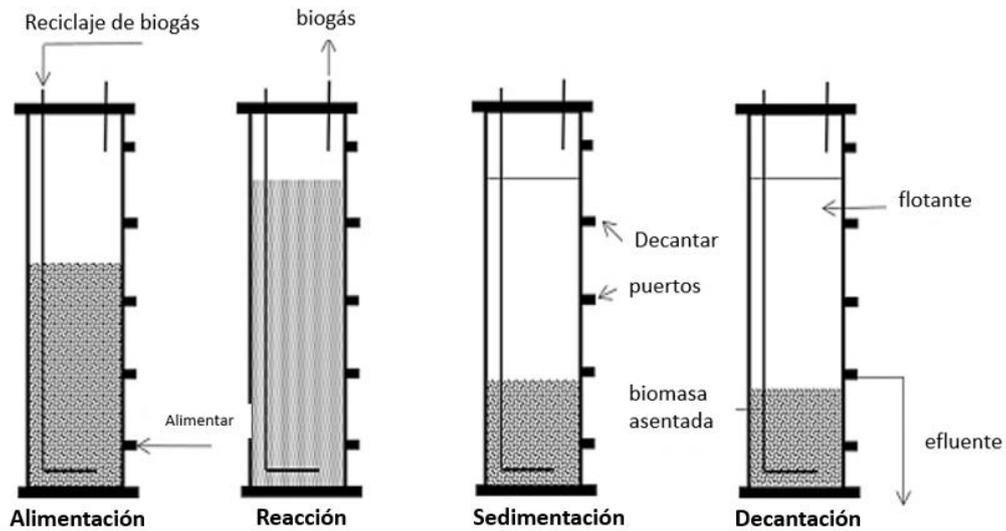


Figura 23. Secuencia de operación en el reactor anaeróbico por lotes secuencial.
Fuente: Srinivasa y Ting, 2017.



Figura 24. Reactor anaeróbico por lotes secuencial.
Fuente: TAERSA, 2020.

Reactor anaerobio con deflectores (ABR, por sus siglas en inglés)
Conceptualmente se podría considerar como una serie de reactores RAFA conectados en serie (Figura 25 y 26). Está formado por un único tanque con una serie de deflectores o paneles internos verticales que fuerzan el paso del agua entre ellos y genera un mayor tiempo de contacto con la biomasa activa (lodo) traduciéndose en un mejor tratamiento (CHEMSOL, 2020).

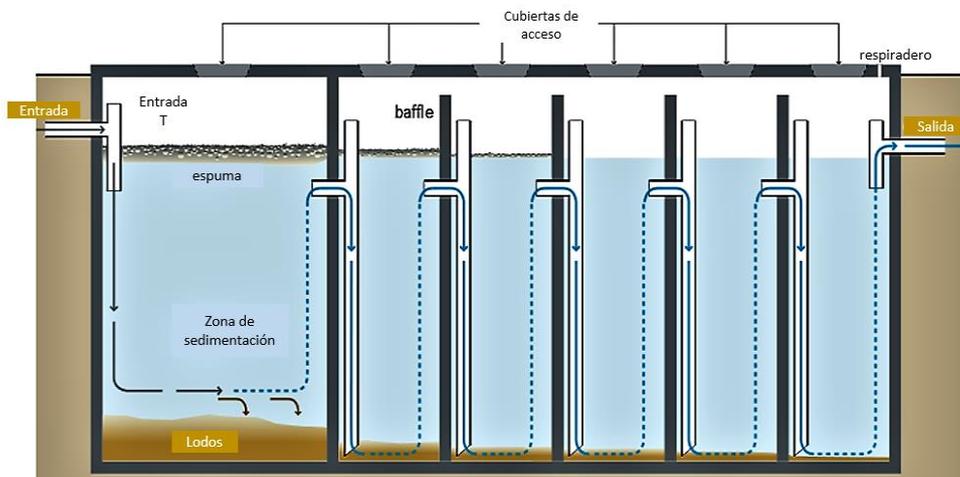


Figura 25. Esquema de reactor anaerobio con deflectores.
Fuente: Eawag, 2020.



Figura 26. Reactor anaerobio con deflectores.

Fuente: CHEMSOL, 2020.

Reactores con biomasa unida a un soporte. En ellos la biomasa se encuentra inmovilizada en, o alrededor de partículas o superficies inertes formando biopelículas (Márquez, 2020). Estos microorganismos crecen adheridos a un material inerte, ya sea sintético (como materiales plásticos, espumas, cerámicas, entre otros) o natural (principalmente rocas, carbón, basalto, entre otros) (Nava, 2014). Estos sistemas han demostrado su eficiencia y flexibilidad en el tratamiento de aguas residuales con alta carga orgánica debido a que se caracterizan por presentar una mayor concentración de biomasa en el reactor; actividad metabólica elevada atribuida a la alta concentración de nutrientes adheridos a la biopelícula y a las diferentes interacciones entre especies microbianas (Cohen, 2001).

Filtros anaerobios (AF, por sus siglas en inglés). La biomasa se encuentra unida a un medio inerte o atrapada en él. El influente atraviesa el reactor con flujo vertical, ya sea ascendente o descendente. El tamaño de dichas partículas es relativamente grande y su tasa de colonización por parte de las bacterias depende de la rugosidad, porosidad, tamaño de poro, entre otras (Márquez, 2020).

Reactores de contacto con soporte (CASBER). Estos reactores son, en esencia, idénticos a los sistemas de contacto, pero con la incorporación de un medio inerte en el reactor. La cantidad de material soporte es pequeña, sus dimensiones también lo son y tienen baja velocidad de sedimentación (Márquez, 2020).

Reactores de lecho fluido y lecho expandido (FBR / EBR por sus siglas en inglés). Técnicamente, un reactor FEB (Figura 27) es una estructura cilíndrica, empaquetada hasta un 10% del volumen del reactor con un soporte inerte de tamaño pequeño que permite la acumulación de elevadas concentraciones de biomasa que forman películas alrededor de dichas partículas. La expansión del lecho tiene lugar gracias al flujo vertical generado por un elevado grado de recirculación. La velocidad ascensional es tal que el lecho se expande hasta un punto en el que la fuerza gravitacional de descenso es igual a la de fricción por arrastre (Márquez, 2020). Las ventajas de FBR son (1) alta biomasa, (2) alta carga orgánica, (3) alta transferencia de masa, (4) reducción de la carga de impacto y (5) reducción de la obstrucción del medio (Qasim & Zhu, 2018).

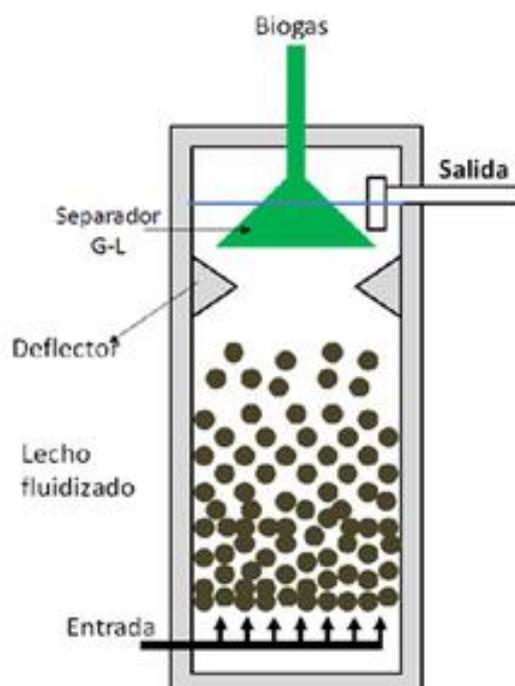


Figura 27. Reactor de Lecho fluidizado

Fuente: Moron, 2018.

El proceso de tratamiento anaerobio presenta ventajas y desventajas de las cuales se presentan en la Tabla siguiente (4). Como se comentaba con anterioridad, el proceso a ocupar dependerá de donde provenga el agua residual, la inversión económica y el tipo de efluente deseado.

Tabla 4. Ventajas y desventajas del proceso de tratamiento anaerobio.

Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere menor energía. • Menor producción biológica de lodos. • Se requieren menos nutrientes. • Producción de metano, una fuente potencial de energía. • Se requiere un volumen de reactor más pequeño. • Eliminación de la contaminación del aire por gases de escape. • Respuesta rápida a la adición de sustrato después de largos períodos sin alimentación .
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor tiempo de arranque para desarrollar inventario de biomasa necesaria. • Puede requerir la adición de alcalinidad. • Puede requerir un tratamiento adicional con un proceso de tratamiento aeróbico para cumplir con los requisitos de descarga. • La eliminación biológica de nitrógeno y fósforo no es posible. • Mucho más sensible al efecto adverso a temperaturas más bajas en las velocidades de reacción. • Puede ser más susceptible a molestias debido a sustancias tóxicas. • Alto potencial de producción de olores y gases corrosivos.

Global Water & Energy (2020) menciona que las corrientes de aguas residuales provenientes de la producción de alimentos y bebidas, la producción de biocombustibles, las fábricas de pasta, papel y la industria química tienen una alta carga de contaminantes orgánicos y pueden tratarse de manera eficaz mediante diversos procesos anaeróbicos. Sin embargo, la variación de los componentes de las aguas residuales, el amplio rango de posibles concentraciones de DQO y las condiciones locales de cada agua residual, requieren una selección cuidadosa entre los diferentes tipos de reactores anaeróbicos. Una sola tecnología anaerobia no es la mejor solución para todas las aplicaciones.

Sistemas de tratamiento aeróbico

Este tipo de tratamiento lleva a cabo procesos catabólicos oxidativos. Como el catabolismo oxidativo requiere la presencia de un oxidante de la materia orgánica y normalmente este no está presente en las aguas residuales, requiere ser introducido artificialmente. La forma más conveniente de introducir un oxidante es por la disolución del oxígeno de la atmósfera, utilizando la aireación mecánica, lo que implica altos costos operacionales del sistema de tratamiento. Adicionalmente la mitad de la DQO de la materia orgánica es convertida en lodo (Figura 28), que cuenta con un alto contenido de material vivo que debe ser estabilizado (Rodríguez A., 2020).

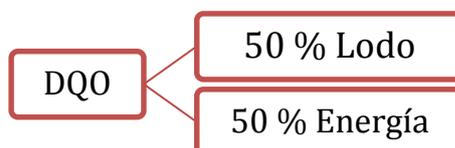
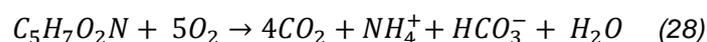


Figura 28. Balance aerobio de DQO.

La reacción bioquímica simplificada de la biomasa ($C_5H_7O_2N$) en condiciones aeróbicas está dada por la ecuación 28.



Los sistemas aeróbicos de tratamiento de aguas residuales, aprovechan la capacidad de los microorganismos de asimilar materia orgánica y nutrientes (nitrógeno y fósforo) disueltos en el agua residual para su propio crecimiento, en presencia de oxígeno, que actuará como aceptor de electrones en el proceso de oxidación de la materia orgánica (Qasim & Zhu, 2018).

El Manual Técnico sobre Tecnologías biológicas aerobias aplicadas al tratamiento de aguas residuales industriales (Buitrón, 2018), describe que la eliminación de la materia orgánica, la coagulación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica son llevadas a cabo por una gran variedad de microorganismos, principalmente bacterias. Por tanto, para diseñar efectivamente cualquier proceso de tratamiento biológico de agua, es necesario tener en cuenta:

- (i) los requerimientos nutricionales de los microorganismos (necesarios para el crecimiento celular y la obtención de energía);
- (ii) el metabolismo de los microorganismos;
- (iii) la relación entre crecimiento microbiano y utilización del sustrato; y
- (iv) los factores ambientales que afectan el crecimiento microbiano. Entre los factores ambientales más importantes para tener en cuenta están la temperatura, el pH y el oxígeno presente en el reactor biológico.

Las ventajas de la digestión aeróbica son (Qasim & Zhu, 2018):

- simple de operar
- bajo costo de capital,
- el sobrenadante es bajo en DBO_5
- adecuado para digerir lodos ricos en nutrientes
- el lodo digerido se deshidrata fácilmente en lechos de secado de arena.

Las desventajas reportadas son:

- poca capacidad de deshidratación por equipo mecánico
- alto costo de operación debido a la alta tasa de suministro de aire
- el rendimiento se ve afectado por la temperatura, la concentración de sólidos y el equipo de aireación y mezcla
- no produce metano para la recuperación de energía

Lodos activados (LA).

El proceso más utilizado y conocido en tratamiento biológico de aguas residuales es el proceso de lodos activos o lodos activados. Se fundamenta en la utilización de microorganismos, mayoritariamente bacterias heterótrofas facultativas, que crecen naturalmente en el agua residual y convierten la materia orgánica disuelta presente en el agua en productos más simples (dióxido de carbono y agua) y nuevas bacterias. El proceso de lodos activos consta principalmente de: (i) un tanque de aireación (reactor) en el cual los microorganismos se mantienen en suspensión y aireados; (ii) de un sistema de separación de sólidos (normalmente un tanque de sedimentación) y (iii) de un sistema de recirculación para devolver la biomasa sedimentada (microorganismos y sólidos inertes) al reactor. El proceso de lodos activos es un proceso de biomasa en suspensión, los microorganismos crecen en suspensión y se agrupan formando flóculos que a su vez forman una masa microbiana activa llamada “lodo activo o activado”. El término “activo” se refiere a la capacidad de este lodo (microorganismos) para metabolizar la materia orgánica soluble y coloidal a dióxido de carbono y agua. La mezcla de los lodos activos y del agua residual se denomina “licor de mezcla” (Buitrón, 2018).

Los parámetros más importantes de una planta de lodos activados son el suministro de oxígeno o aire, la mezcla, la proporción alimentación / microorganismos (o carga orgánica) y retorno del flujo de lodos activados. Además, algunos índices no teóricos como la capa de lodo, el volumen de lodo sedimentado, el índice de volumen de lodo (IVL) y el índice de densidad de lodo (IDL) también son herramientas valiosas para la operación diaria y el control de un proceso de lodo activado (Qasim & Zhu, 2018).

El proceso de lodos activados consiste en tres componentes, un reactor biológico donde los microorganismos se mantienen en suspensión y aireamiento; un tanque de sedimentación o clarificador; y un sistema de recirculación para regresar al reactor los sólidos sedimentados (Figura 29).

Los reactores de lodos activados del tipo convencional tienen la finalidad de efectuar la degradación de la materia orgánica. La depuración se realiza con un cultivo mixto de microorganismos en suspensión sujetos a condiciones aeróbicas, en un sistema de mezcla completa que es proporcionado por un sistema de paneles de difusores, que a la vez crea un buen contacto entre los microorganismos y la materia orgánica “substrato”, eliminando zonas sin mezclado o zonas muertas.

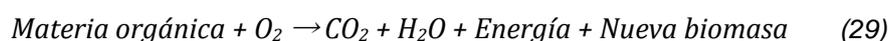
En el tanque de lodos activados se tiene una población mixta de microorganismos (lodos biológicos) que toman como “alimento” la materia orgánica remanente de la etapa

primaria de cribado fino, para utilizarla como fuente de energía para poder vivir (respirar) y sintetizar nuevo material celular, llevando a cabo una serie de reacciones complejas hasta oxidar los compuestos a formas más simples.

Los disparos de aireación transportan aire en su interior que es suministrado por los sopladores, el aire sale en forma de microburbuja de las membranas y realiza las siguientes funciones:

- Proveer el suministro intensivo de aire-oxígeno el cual es imprescindible para el sistema de lodos activados.
- Disponer la energía necesaria para mantener en agitación todo el cuerpo de agua dentro del reactor.

Lo anterior promueve un ambiente rico en oxígeno a las bacterias contenidas en los lodos activados para que estas lleven a cabo la reacción de oxidación en productos finales, tales como dióxido de carbono y agua (PTAR A, 2012):



Luego, la mezcla pasa al sedimentador secundario, donde tiene lugar la clarificación del efluente y el espesamiento de los sólidos sedimentados. El efluente clarificado se descarga para su posterior tratamiento o eliminación. Los sólidos espesados se eliminan como flujo inferior. Una parte del flujo inferior se desperdicia (lo que se denomina lodo activado residual, WAS por sus siglas en inglés), mientras que el resto (20% a 50%) se devuelve al tanque de aireación como lodo activado de retorno (RAS, por sus siglas en inglés). El lodo de retorno ayuda a mantener una alta concentración de biomasa activa en el tanque de aireación.

Se ha desarrollado un gran número de variaciones del proceso de lodos activados y actualmente se utiliza el reactor biológico que puede funcionar como un reactor completamente mixto (reactor de tanque agitado de flujo continuo, CSTR) o como un reactor de flujo pistón. En los últimos tiempos, los procesos de lodos activados se utilizan con mayor frecuencia para la eliminación de DBO junto con la eliminación de nitrógeno y/o fósforo.

La tecnología del proceso de LA ha evolucionado, e incluso, ha sido adaptada a diferentes configuraciones y reactores. También se han estudiado los principales factores que intervienen en el diseño y en la eficiencia del proceso (Metcalf & Eddy, 2003):

- Tiempo de residencia celular (TRC)
- F/M
- TRH
- Temperatura
- Alcalinidad
- Carga Orgánica Volumétrica
- Nutrientes y macronutrientes
- Sedimentación de lodos.

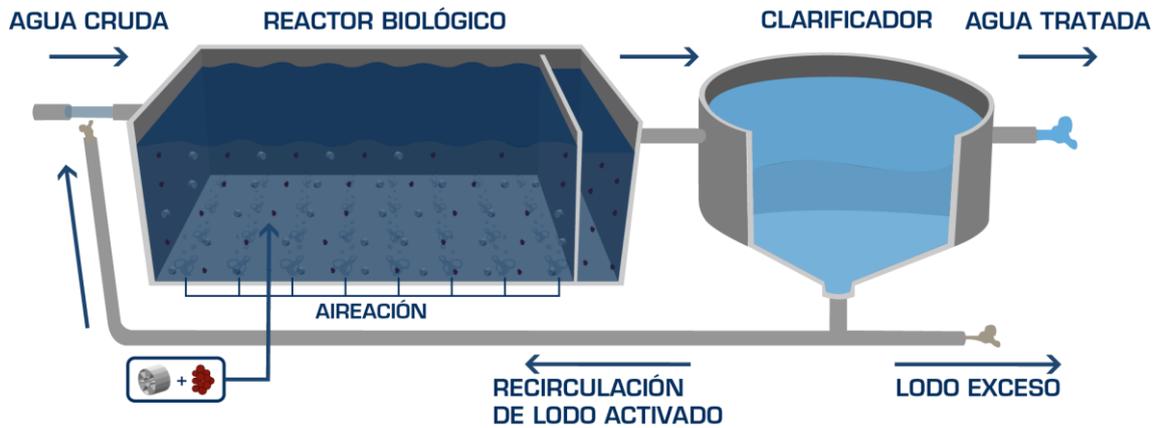


Figura 29. Esquema de un sistema convencional de lodos activados.

Fuente: Ucelo, 2021.

Basado en un proceso biológico, controlado bajo condiciones aerobias que trata efectivamente DQO, DBO y SSV convirtiéndolos en agua, dióxido de carbono y nueva biomasa, encontramos los siguientes sistemas:

Reactor biológico secuencial (SBR por sus siglas en inglés): El RBS es un tipo de sistema de llenado y extracción en el que la aireación, la biodegradación y la sedimentación tienen lugar en un solo reactor. El reactor pasa por una serie de pasos en un ciclo (Figura 30). Como se mencionó con anterioridad (Capítulo 4.1.3) un ciclo típico consta de los siguientes pasos: Llenado, Reacción, Sedimentación, Vaciado.



Figura 30. Reactor Biológico Secuencial.

Fuente: WEHRLE, 2020.

Zanja de oxidación: Este proceso consiste en un canal de aireación de forma ovalada, donde el agua residual fluye en una dirección, seguida de un clarificador secundario. Los aireadores mecánicos de tipo cepillo proporcionan aireación y mezcla, y mantienen el agua fluyendo en la dirección deseada. El influente ingresa al canal y se mezcla con el lodo activado de retorno. La cinética del proceso se asemeja a la de un reactor de mezcla completo, pero con flujo de pistón a lo largo de los canales. La zanja de oxidación se puede diseñar y operar para lograr la eliminación de DBO y nitrógeno (Riffat, 2013).

Reactor Biológico de Membrana (MBR por sus siglas en inglés): El proceso RBM utiliza un reactor biológico con biomasa suspendida para la eliminación de DBO y/o nitrógeno, y membranas de micro o ultrafiltración para la separación de sólidos (Figura 31 y 32) (Riffat, 2013). El 'biorreactor de membrana' (MBR) es generalmente un término utilizado para definir los procesos de tratamiento de aguas residuales en los que una membrana de permeabilidad selectiva, por ejemplo, microfiltración o ultrafiltración, se integra con un proceso biológico, específicamente un biorreactor de crecimiento suspendido.

Los MBR se diferencian de los procesos de "pulido" en los que la membrana se emplea como un paso de tratamiento terciario discreto sin retorno de la biomasa activa al proceso biológico.

Casi todos los procesos comerciales de MBR disponibles en la actualidad utilizan la membrana como filtro, rechazando los materiales sólidos que se desarrollan mediante el proceso biológico, lo que da como resultado un efluente de producto clarificado y desinfectado (Judd S., 2021).

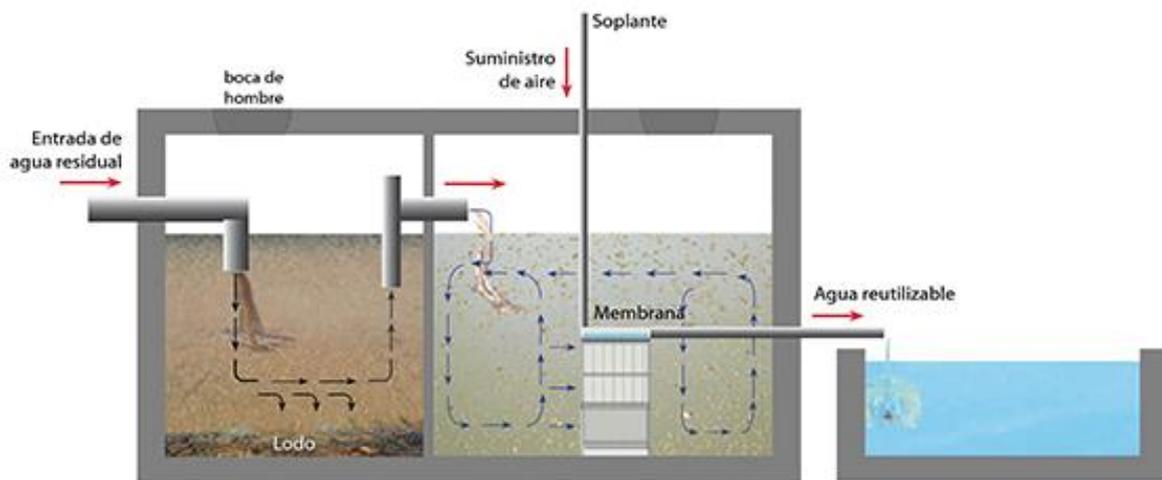


Figura 31. Esquema del proceso en un reactor biológico de membrana aerobio.
Fuente: BioAzul, 2020.



Figura 32. Reactor biológico de membrana para aguas industriales.
Fuente: Aguas Industriales, 2014.

Bioreactor de lecho móvil (MBBR por sus siglas en inglés): Este tratamiento consiste en la degradación de la materia orgánica por parte de bacterias aerobias. El cultivo bacteriano encargado de la depuración se encuentra en forma de biopelícula adherido a soportes de alta superficie específica (relleno filtrante). Estos soportes se encuentran sumergidos y en movimiento en el reactor biológico. Esta tecnología permite aumentar la capacidad de depuración de una instalación ya existente sin necesidad de aumentar el volumen del reactor (Figura 33 y 34). Las bacterias incorporan la materia orgánica a su metabolismo para generar nuevo tejido celular y mantener su actividad vital. La presencia de oxígeno en el reactor se consigue insuflando aire u oxígeno puro (GEDAR, 2020).

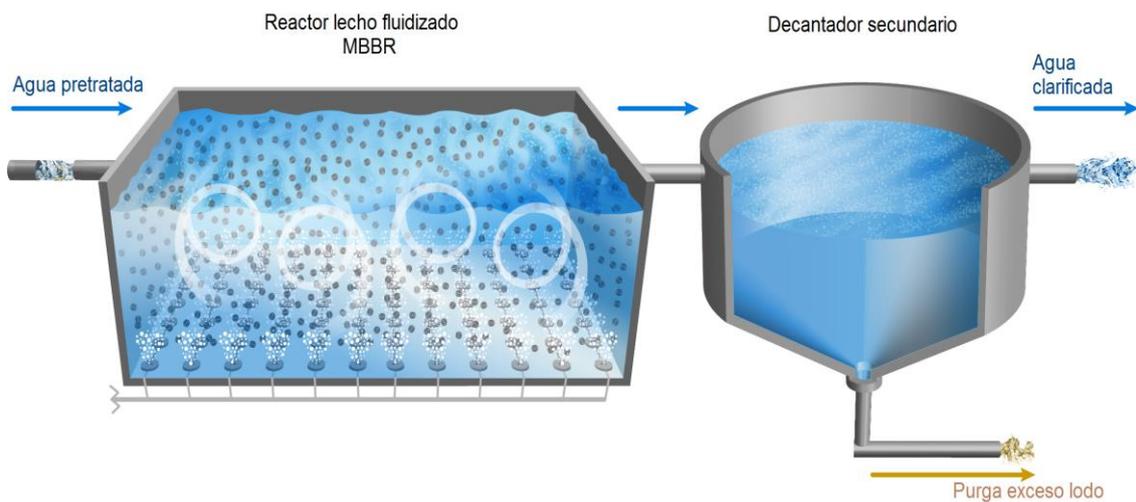


Figura 33. Esquema de un bioreactor de lecho móvil.

Fuente: GENDAR, 2020.

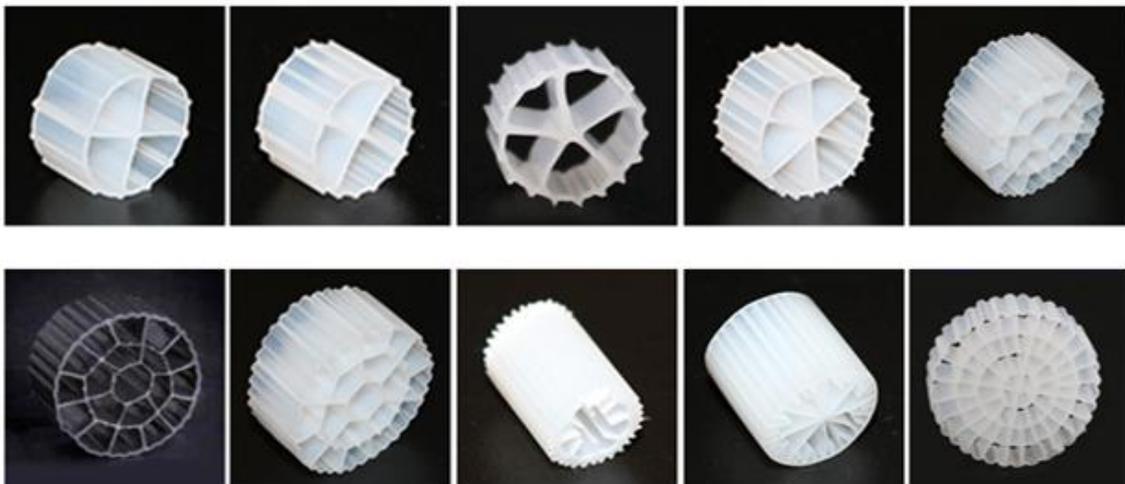


Figura 34. Tipos de lecho móvil.

Fuente: Hebei, 2021.

Los biodiscos o contactores biológicos rotatorios (RBC por sus siglas en inglés) Los Contactores Biológicos Rotativos, también llamado "biodiscos", son sistemas de tratamiento de agua residual, en los que los microorganismos se hallan adheridos a un

material soporte, que gira semisumergido (aproximadamente el 40% de su superficie) en el agua a depurar (Figura 35). Estos sistemas, junto con los lechos bacterianos, suponen una alternativa tecnológica al proceso convencional de lodos activos.

Entra en contacto con el aire y las aguas residuales de forma alterna, manteniendo así las condiciones aeróbicas, ya que el eje con los discos gira en el tanque. La velocidad de rotación varía de 1 a 2 rpm. Debe ser suficiente para proporcionar la cizalladura hidráulica necesaria para el desprendimiento de biopelícula y para mantener suficiente turbulencia para mantener los sólidos en suspensión en las aguas residuales (Riffat, 2013).



Figura 35. Contactores biológicos rotativos

Fuente: Bioplast depuración, 2020.

La Tabla 5 presenta los parámetros del proceso para cada una de las cuatro modificaciones o tipos de lodos activados comúnmente utilizadas. Consecuentemente, la Tabla 6 muestra algunas bases de diseño de un reactor convencional de tratamiento de agua residual.

Tabla 5. Parámetros de procesos de Lodos Activados.

Parámetros	Convencional	Estabilización de contacto	Aireación extendida	Zanja de Oxidación
Tiempo de aireación (h)	4-8	0.5-1.5 (contacto) 3-6 (reaireación)	24	24
Tiempo de estabilización (h)	2-4	2-4	2-4	2-4
Tasa de retorno (% de flujo de afluente)	25-100	25-100	25-100	25-100
Sólidos Suspendidos en el Licor Mezclado SSLM (mg/L)	1500-4000	1000-3000 3000-8000	2000-6000	2000-6000
DO (ml/L)	1-3	1-3	1-3	1-3
SSV (ml/L)	400-700	400-700 (contacto)	400-700	400-700
F/ M (kg DBO ₅ / kg SSVLM)	0.2-0.5	0.2-0.6 (contacto)	0.05-0.15	0.05-0.15
TMRC (d)	5-15	N/A	20-30	20-30
% Remoción DBO ₅	85-95	85-95	85-95	85-95
% Remoción SST	85-95	85-95	85-95	85-95
Tratamiento primario	Si	No	No	No

Fuente: Adaptación de Spellman, 2011.

Tabla 6. Bases de diseño de un reactor de lodos activados en PTAR A.

BASES DE DISEÑO DE REACTOR	
Flujo medio (L/s)	375 L/s / reactor
DBO ₅ - entrada	192.5 ppm
DBO ₅ - salida	20 ppm
Carga orgánica/reactor	6 237 kg DBO ₅ /d
Eficiencia mínima	90%
Eficiencia esperada	95%
Vol. total reactor	9 735 m ³
SSLM	2.85 kg/m ³
SSVLM	1.95 kg/m ³
Tiempo de retención	7.0 h
F/M en base DBO ₅	0.23 kg DBO ₅ /kg SST d
WAS total	8 830 kg SST/d
Volumen total WAS Requerimiento de oxígeno / DBO ₅	1 032 m ³ /d
Aire suministrado total	17 036 m ³ /h (10 080.6 scfm)

Fuente: PTAR A, 2012.

Clarificadores secundarios

Los tanques clarificadores secundarios, también conocidos como sedimentadores secundarios tienen la función de separar los sólidos posteriores a un tratamiento biológico (Figura 36).

La función básica del clarificador secundario, es la de separar líquidos de sólidos, concentrar los sólidos formando así una interfaz de lodo (cama de lodos) en su fondo y retirarlos (purgar), cabe mencionar que no está diseñado para usarse como tanque de almacenamiento de sólidos. La cama de lodos es extraída de forma constante a través de una rastra tubular flotante tipo sifón y descarga los lodos a un canal paralelo al canal de agua tratada, para seguir con el tratamiento terciario.

El clarificador secundario está diseñado para realizar dos funciones principales: (1) proporcionar sedimentación por gravedad de sólidos y clarificación de efluentes y (2) producir subflujos espesados. Para lograr ambas funciones, se necesitan profundidades suficientes de zona clarificada y zona de lodos. En la zona clarificada más profunda, los sólidos sedimentados permanecen considerablemente por debajo del vertedero y no se pierden en el efluente. La zona de lodo más profunda proporciona almacenamiento para los sólidos sedimentados para espesar y mantener una capa de lodo adecuada. Si no se mantiene una capa de lodo suficiente, el lodo no espesado se devolverá al tanque de aireación. Las consideraciones de diseño básico para las cuencas de sedimentación primaria incluyen: tasa de desbordamiento de la superficie o tasa de sedimentación de la superficie; tiempo de retención; tasa de carga del vertedero y longitud del vertedero;

forma y dimensiones del tanque; tasa de carga de sólidos; estructura del afluyente; estructura del efluente; y recolección y eliminación de lodos (Qasim & Zhu, 2018).

La clarificación de alta velocidad emplea tratamiento físico/químico y utiliza sistemas especiales de floculación y sedimentación para lograr un asentamiento rápido. Los elementos esenciales de esta separación son la configuración mejorada de partículas y el uso de asentamientos inclinados de placas o tubos. Las ventajas de la alta velocidad son que las unidades son compactas y, por lo tanto, reducen los requisitos de espacio, los tiempos de arranque son rápidos (generalmente menos de 30 minutos) para lograr la máxima eficiencia y se produce un efluente altamente clarificado.

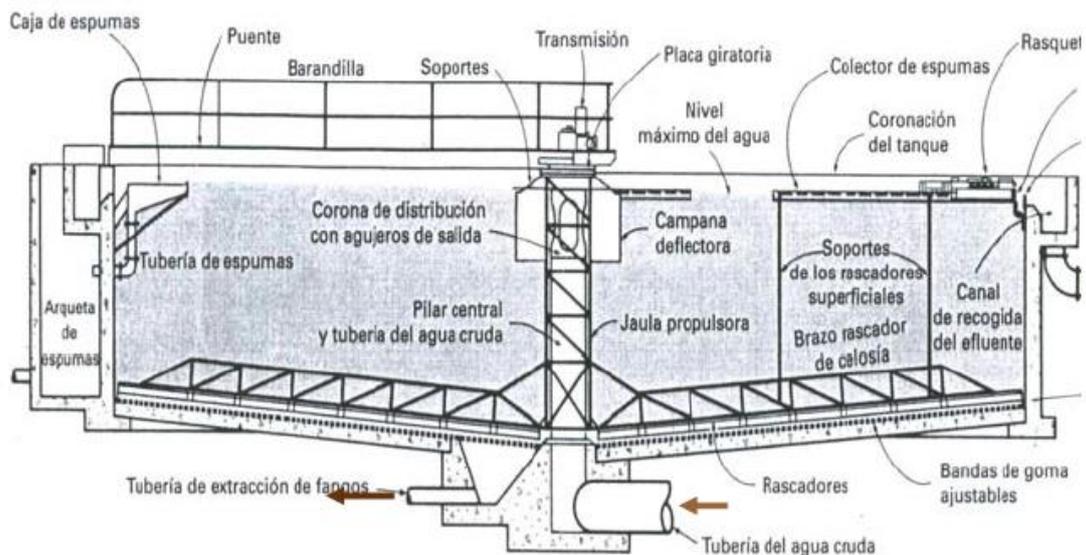


Figura 36. Esquema de un clarificador secundario.

Fuente: Picón, 2015.

Rastra. En el fondo de los clarificadores se encuentra la zona de espesamiento de lodos, que es extraída parcialmente mediante una rastra tubular flotante tipo sifón y descarga los lodos a un canal rectangular paralelo al canal de agua tratada. El canal de lodos se comunica en la parte central a un cárcamo de bombeo. Cada clarificador tiene un canal y un cárcamo de lodos, con equipos de bombeo sumergible para el desalojo de los lodos (PTAR A, 2012).

Velocidad y concentración de lodos activados de retorno. La tasa de lodos es una variable de control crítica. El operador debe mantener un retorno continuo de lodo activado al tanque de aireación o el proceso mostrará una disminución drástica en el rendimiento. Si la tasa es demasiado baja, los sólidos permanecen en el tanque de sedimentación, lo que resulta en una pérdida de sólidos y un retorno séptico. Si la tasa es demasiado alta, el tanque de aireación puede sobrecargarse hidráulicamente, lo que reduce el tiempo de aireación y reduce el rendimiento.

La concentración de retorno también es importante porque se puede utilizar para determinar la tasa de retorno necesaria para mantener el SSLM deseado.

La cantidad de sólidos eliminados del proceso como lodos residuales activados es un parámetro importante de control del proceso con el que los operadores deben estar familiarizados y, lo que es más importante, deben saber cómo calcularlo (Spellman, 2011):

$$\text{Lodos } \left[\frac{\text{kg}}{\text{día}} \right] = \text{Concentración de lodos } \left[\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right] * \text{Flujo de Lodos } \left[\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right] * \left[\frac{1\text{kg}}{1000\text{ mg}} \right] * \left[\frac{1000\text{L}}{1\text{ m}^3} \right] \quad (30)$$

4.2.4 Tratamiento terciario

Esta es la etapa final del tratamiento de agua residual. En ella se realiza una serie de procesos, entre ellos la eliminación de agentes patógenos como bacterias fecales y de nutrientes. Según la conferencia “Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales” (2002), tiene como objetivo complementar los procesos anteriormente indicados para lograr efluentes más puros, con menor carga contaminante y que pueda ser utilizado para diferentes usos como descargada en mares, ríos, lagos y demás cuerpos de agua, recarga de acuíferos, recreación, agua industrial, entre otros. Cabe resaltar que esta etapa del tratamiento es la que menor tiempo conlleva, ya que son las etapas anteriores las que remueven la mayor cantidad de contaminantes en el agua.

Las sustancias o compuestos comúnmente removidos son:

- Fosfatos y nitratos.
- Huevos y quistes de parásitos.
- Sustancias tensoactivas.
- Algas.
- Bacterias y virus.
- Radionúclidos.
- Sólidos totales y disueltos.

El tratamiento terciario tiene el objetivo de usarse como sistemas de pulido de agua residual, para un muy estricto límite permitido o incluso para una calidad que permita la reutilización en sus procesos de producción. Los procesos de tratamiento de esta categoría están conformados por procesos físicos, químicos y biológicos. Algunos de los sistemas más usados son:

Desinfección

La desinfección es comúnmente lograda por el uso de agentes químicos, agentes físicos, medios mecánicos y radiación (Metcalf & Eddy, 2003).

Agentes químicos

Los agentes químicos que se han utilizado como desinfectantes incluyen: cloro y sus compuestos, bromo, yodo, ozono, fenol y compuestos fenólicos, alcoholes, metales pesados y compuestos relacionados, peróxido de hidrógeno, ácido peracético, varios álcalis y diversos ácidos (Metcalf & Eddy, 2003).

Compuestos de Cloro

Es un desinfectante de gran poder bactericida, aún en dosis pequeñas. Es económico y de fácil empleo, aunque requiere precaución en su manejo. Es el reactivo más usado a

nivel mundial tanto en los sistemas de agua potable como residual (CONAGUA 23, 2019).

Los principales compuestos de cloro utilizados en el tratamiento de agua residual son cloro (Cl_2), hipoclorito de sodio (NaClO), hipoclorito de calcio ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$) y dióxido de cloro (ClO_2) (Metcalf & Eddy, 2003).

Ozono

Es utilizado en el tratamiento de agua para el control de olor y remoción de compuestos orgánicos, es un gas inestable producido por la disociación de los átomos de oxígeno (Figura 37). Además de ser un oxidante extremadamente reactivo, se cree que generalmente mata a las bacterias directamente debido a la desintegración de la pared celular.

El ozono también es un viricida muy efectivo y generalmente se cree que es mayor que el cloro. La ozonización no produce sólidos disueltos y no se ve afectada por el ion amonio o el pH que influye en el proceso.

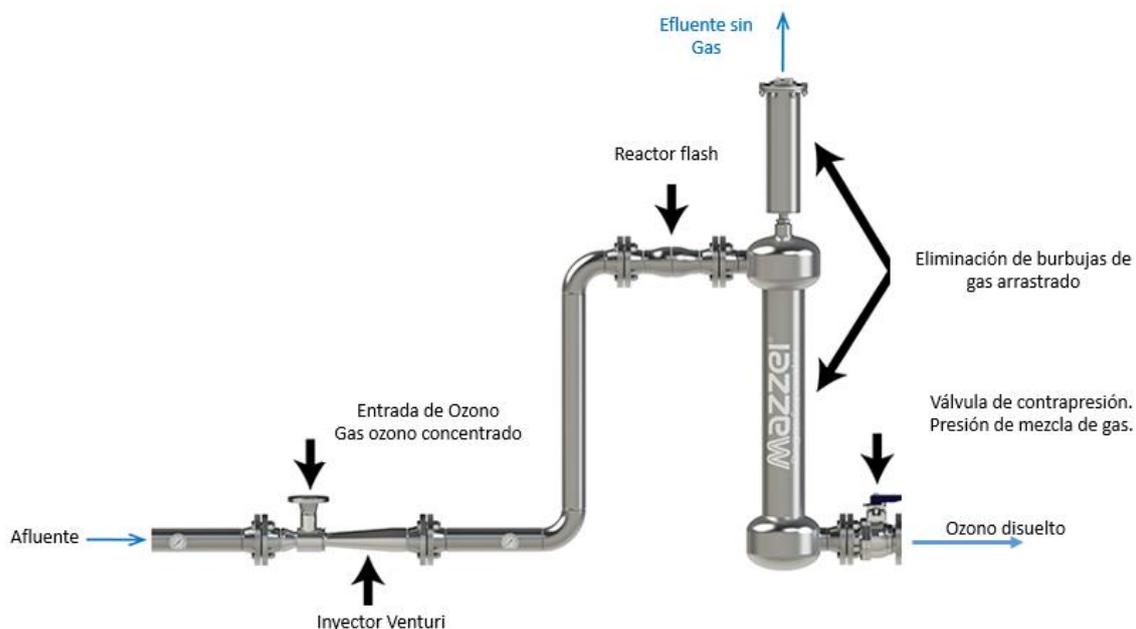


Figura 37. Proceso de ozonificación.

Fuente: Mazzei, 2020.

Agentes físicos

Los desinfectantes físicos que se pueden utilizar son el calor, la luz y las ondas sonoras.

Radiación

Los principales tipos de radiación son electromagnéticos, acústicos y de partículas. Los rayos gamma se emiten desde los radioisótopos, como el cobalto -60. Debido a su poder de penetración, los rayos gamma se han utilizado para desinfectar (esterilizar) tanto el agua como las aguas residuales. Aunque se ha estudiado ampliamente el uso de un dispositivo de haz de electrones de alta energía para la irradiación de aguas residuales o lodos, no hay dispositivos comerciales ni instalaciones a gran escala en funcionamiento.

Radiación UV

La radiación UV es una potente biocida y su efectividad aplica en un amplio grupo de microorganismos patógenos.

La radiación ultravioleta se caracteriza por longitudes de onda muy cercanas a la luz del sol. La radiación UV es una forma de luz más energética que la visible y por tanto con una longitud de onda menor que puede ir desde los 400 hasta los 150 nanómetros (nm). Recientemente se ha incrementado su uso para la desinfección de efluentes de plantas de tratamiento de agua, debido a que no produce cambios físicos o químicos notables en el agua tratada (Figura 38).

En función de la longitud de onda podremos distinguir tres tipos de radiación UV (Hidritec, 2016):

UV-A. Con una radiación que va desde los 320 a los 400 nm. Es la más cercana al espectro visible y no es absorbida por el ozono.

UV-B. Va de los 280 a los 320 nm. La capa de ozono absorbe casi por completo este tipo de radiación que es muy dañino provocando alteraciones en el ADN.

UV-C. Para una longitud de onda menor de 280 nm. Este tipo de radiación es extremadamente peligroso y dañino ya que es el más energético, pero es absorbido completamente por el ozono y el oxígeno.

Así, el efluente de la planta se expone a la luz ultravioleta de una longitud de onda e intensidad especificadas durante un período de contacto, por lo tanto, la eficacia del proceso al contacto depende de:

- Intensidad de la luz ultravioleta
- Tiempo de contacto
- Calidad de las aguas residuales (turbidez)

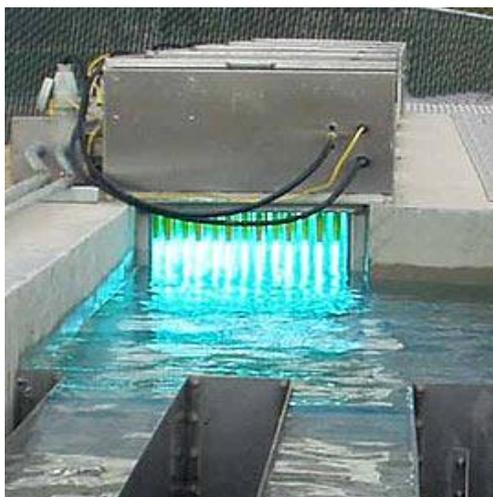


Figura 38. Equipo de radiación UV.

Fuente: Aguas Industriales, 2014.

Medios mecánicos

Las bacterias y otros organismos también se eliminan por medios mecánicos durante el tratamiento de agua residual.

Filtros de arena, medios filtrantes y filtros de carbón activado

Son los elementos más utilizados para filtración de agua con cargas de contaminantes bajas o medianas, que requieran una retención de partículas de hasta veinte micras de tamaño o menos. Las partículas en suspensión que lleva el agua son retenidas durante su paso a través de un lecho filtrante de arena, carbón activado u otro material. La Figura 39 muestra un diagrama de tipos de filtros en un proceso de tratamiento.

Sistemas de membranas

Existen varios tipos: Microfiltración (MF), Ultrafiltración (UF), Nanofiltración (NF), Ósmosis Inversa (RO), ofrece un amplio rango de posibilidades de tratamiento gracias a las diferentes combinaciones entre configuración física, diámetro de poros, arreglo hidráulico y número de pasos, que van desde reducción de sólidos suspendidos y turbiedad hasta desionización y desinfección.

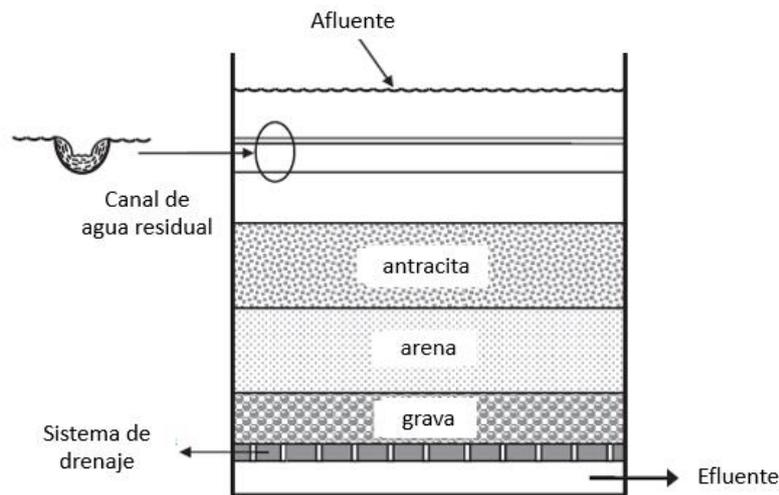


Figura 39. Esquema de filtro de medio convencional.

Fuente: Paul, 2017.

Microfiltración y Ultrafiltración

El principio de la micro y ultrafiltración es la separación física (Figura 40). Es el tamaño de poro de la membrana lo que determina hasta qué punto son eliminados los sólidos disueltos, la turbidez y los microorganismos. Las sustancias de mayor tamaño a los poros de la membrana son retenidas totalmente (LENNTECH, 2020).

- Microfiltración: las membranas usadas tienen un tamaño de poro de 0.1 y 10 μm . Puede ser aplicada a diferentes tipos de tratamientos de agua cuando se necesita retirar de un líquido las partículas de un diámetro superior a 0.1 mm.
- Ultrafiltración: Permite retener moléculas cuyo tamaño oscila entre 0.001 y 0.1 μm .

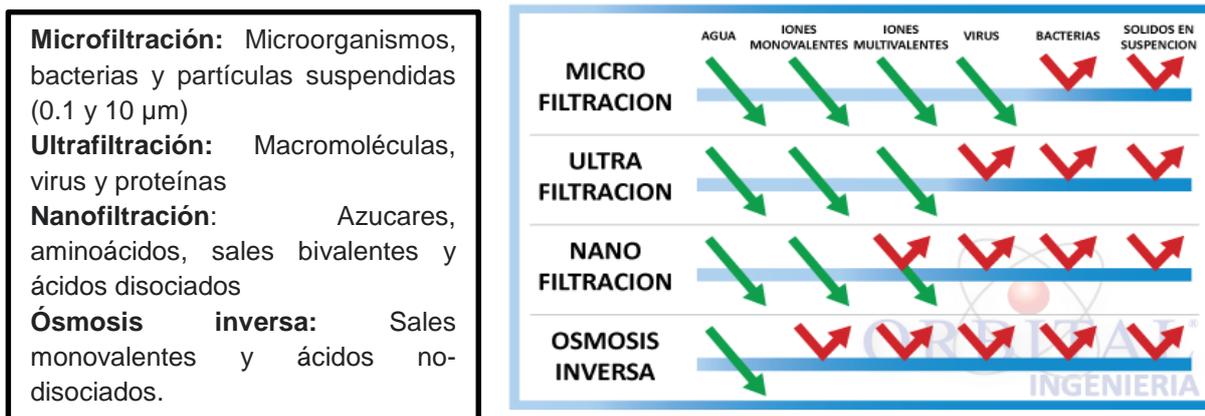


Figura 40. Tipos de filtración y permisibilidad de entrada de sus poros.

Fuente: Orbital Ingeniería, 2013.

Ósmosis Inversa

Consiste en aplicarle a la disolución concentrada una presión superior a la osmótica, produciéndose el paso de disolvente (agua) desde la disolución más concentrada a la más diluida hasta alcanzar un nuevo equilibrio (Figura 41). Usando esta técnica, se elimina la mayor parte del contenido de sales en el agua.

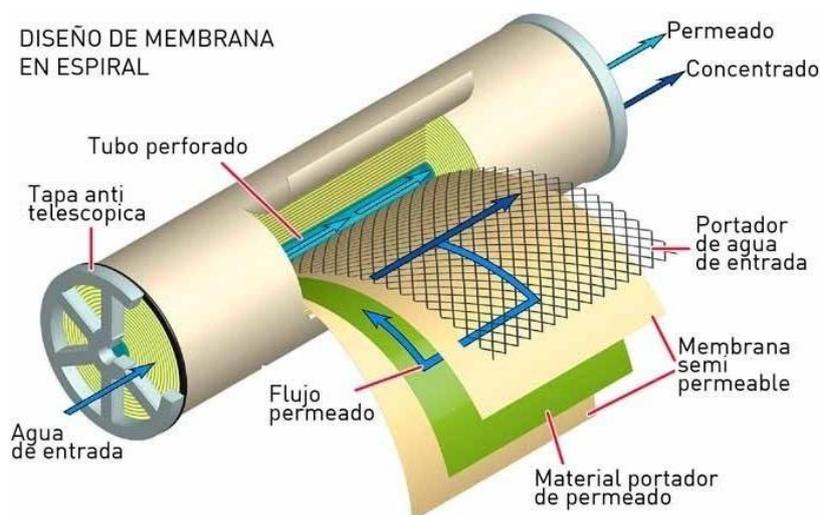


Figura 41. Esquema de un sistema de ósmosis inversa.

Fuente: Osmofilter, 2018.

4.2.5 Tratamiento avanzado

Se utilizan procesos de tratamiento avanzados cuando se desea la eliminación adicional de constituyentes en aguas residuales debido a la toxicidad de ciertos compuestos, o para posibles aplicaciones de reutilización de agua. Los ejemplos incluyen adsorción de carbón activado para la eliminación de compuestos orgánicos volátiles e intercambio iónico para la eliminación de iones específicos. Los cuales se enlistan algunos de los sistemas:

Intercambio Iónico

El intercambio iónico es una operación de separación basada en la transferencia de materia fluido-sólido (Figura 42 y 43). En el proceso de intercambio iónico ocurre una reacción química en la que los iones móviles hidratados de un sólido son intercambiados por iones de igual carga de un fluido. Este proceso consiste en pasar el fluido sobre un intercambiador catiónico y/o aniónico sólido, reemplazando los cationes y/o aniones por el ion hidrógeno (H^+) y/o el ion hidroxilo (OH^-) respectivamente. La eficiencia de este proceso depende de factores como la afinidad de la resina por un ion en particular, el pH del fluido, la concentración de iones, la temperatura y la difusión (Pérez, 2015).

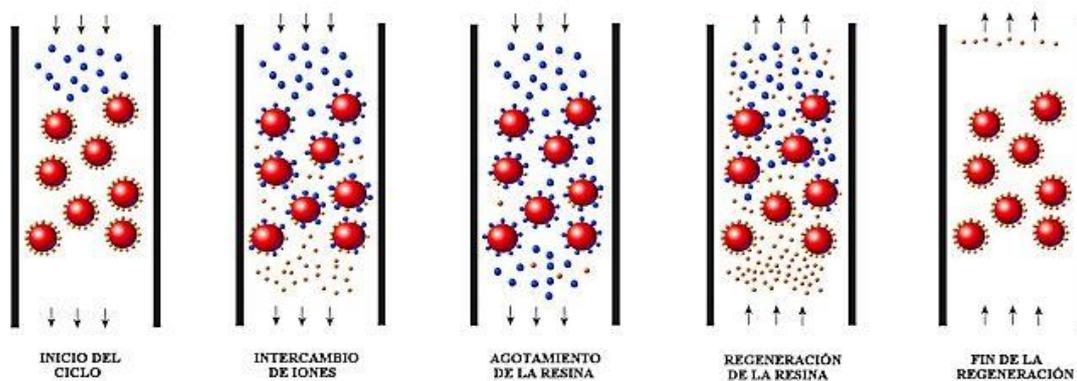


Figura 42. Esquema de proceso del intercambio iónico.

Fuente: GWC, 2014

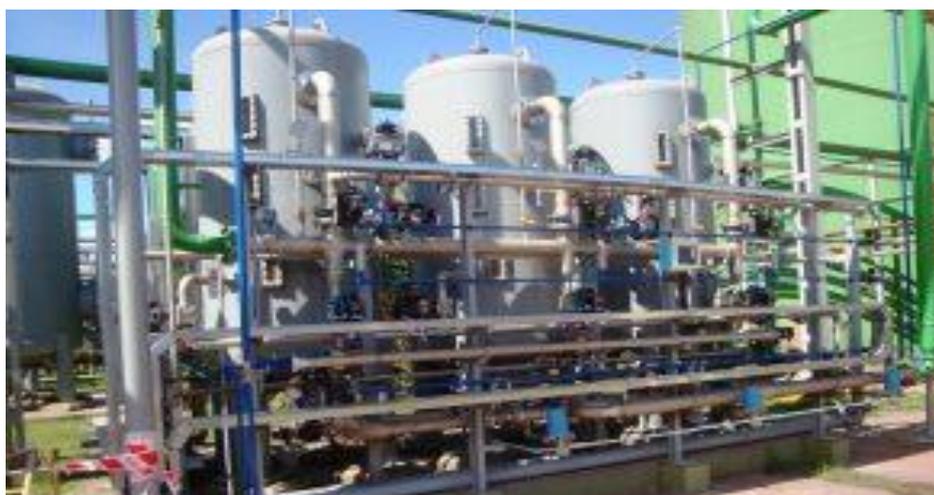


Figura 43. Proceso del intercambio iónico.

Fuente: Taersa, 2020.

Adsorción

Según la empresa Condorchem Envitech (2021), el proceso de adsorción consiste en la captación de sustancias solubles en la superficie de un sólido. Un parámetro fundamental en este caso será la superficie específica del sólido, dado que el compuesto soluble a eliminar se ha de concentrar en la superficie del mismo. Se utiliza para eliminar fenoles, hidrocarburos aromáticos nitrados, derivados clorados, así como para eliminar olor, color y sabor. El adsorbente más utilizado en el tratamiento de aguas es el carbón activado, Figura 44.



Figura 44. Filtro de carbón activado.

Fuente: AQUAPROF, 2018.

4.2.6 Manejo de lodos

Los sólidos que se generan a partir de procesos de tratamiento de aguas residuales primarios, secundarios y avanzados se denominan lodos (Figura 45). El lodo suele estar en forma de líquido o líquido semisólido, que normalmente contiene de 0.25% a 12% de sólidos en peso.

El lodo primario consiste en sólidos sedimentables transportados en las aguas residuales crudas; el lodo secundario consta de sólidos biológicos y de sólidos sedimentables adicionales, mientras los lodos producidos en las aguas residuales avanzadas pueden incluir virus, metales pesados, fósforo o nitrógeno (Riffat, 2013).

Cuando hablamos de lodos o biosólidos, estamos hablando del mismo material. Cada uno se define como los sólidos en suspensión que se eliminan de las aguas residuales durante la sedimentación y luego se concentran para su posterior tratamiento y eliminación o reutilización. La diferencia entre lodos y biosólidos radica en la forma en que se gestionan. Por lo general, se considera que los lodos son sólidos de aguas residuales que se eliminan, mientras que los biosólidos son la misma sustancia que se maneja para su reutilización beneficiosa (por ejemplo, para la aplicación en tierra como remediación del suelo, usándolo de compostaje). A medida que los estándares de tratamiento de aguas residuales se han vuelto más estrictos debido a las crecientes regulaciones ambientales, el volumen de lodos de aguas residuales ha aumentado.

La tarea de eliminar, tratar o reutilizar los sólidos del agua residual se denomina gestión de lodos o biosólidos (Riffat, 2013).



Figura 45. Lodos producidos en una PTAR.

Fuente: Construcción y vivienda, 2020.

Los procesos típicos de manejo de lodos son: concentración como espesamiento, digestión, acondicionamiento, deshidratación o secado, incineración y oxidación. De éstos, la digestión, incineración u oxidación por vía húmeda son los más empleados para la reducción de la materia orgánica. Y la concentración, acondicionamiento y deshidratación para la eliminación de humedad. El proceso de manejo de lodos va comúnmente de la siguiente manera: espesamiento, estabilización, deshidratación, eliminación final, que serán descritos más adelante.

El lodo procedente de las plantas de tratamiento varía según el giro de la planta.

En la Tabla 7, se describen las características de cada tipo de lodo, primario y secundario.

Tabla 7. Características comunes de los lodos.

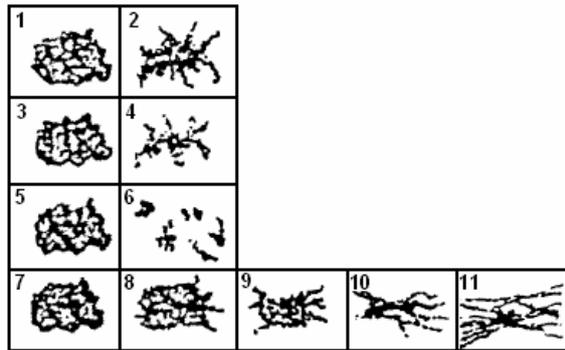
S.P Sedimentador primario F.B Filtro biológico L.A. Lodo Activado P.Q. Precipitación química

Tipo de lodo	Aspecto	Olor	Secado	Humedad (%)
Primario	Pardo y pegajoso	Fuerte	Difícil	95.0 - 97.5
Secundario				
Filtro biológico	Ceniciento floculento	Medio	Medio	92.0 - 95.0
Lodo activado	Marrón floculento	Suave	Difícil	98.5 - 99.5
Precipitación química	Ceniciento gelatinoso	Fuerte	Difícil	93.0 - 95.0
Lodo séptico	Negro	Fuerte	-	-
Lodo digerido	Negro homogéneo granular	Suave	Fácil	S.P 87 F.B 90 L.A. 93 P.Q. 90

Fuente: Rojas, 2002.

A continuación, se muestran las características de los flóculos en los lodos activados y los microorganismos encontrados en los lodos (Figura 46).

FLOCULO DE LOS LODOS ACTIVADOS	
FORMA	Redonda (1) Irregular (2)
ESTRUCTURA	Sólida (3) Laxa (4)
TAMAÑO	Grande (5) Pequeño (6)
FILAMENTOSIDAD	Ninguna (7) Muy poca (8) Poca (9) Mucha (10) Demasiada (11)



	<i>Zoogloea</i>		<i>Flagellata</i>		<i>Vorticella microstoma</i>
	<i>Bacterias Filamentosas (Sphaerotilus)</i>		<i>Colpidium</i>		<i>Carchesium Polupinum</i>
	<i>Spirillum</i>		<i>Paramecium</i>		<i>Opercularia/Epistilis</i>
	<i>Beggiatoa</i>		<i>Aspidisca</i>		<i>Podophyra Fixa</i>
	<i>Amoeba</i>		<i>Vorticella convallaria</i>		<i>Rotatoria</i>

Figura 46. Microorganismos encontrados en los lodos.

Fuente: PTAR A, 2012.

Los lodos que se generan en el tratamiento del agua tienen un alto contenido de agua que hace su volumen muy grande y causa dificultades en su manejo. Es por esto que el primer objetivo en el tratamiento de los lodos es reducirlo.

El agua contenida en el lodo se clasifica en tres tipos de acuerdo con su combinación con las partículas sólidas: agua intermedia o intersticial (alrededor de 70% del volumen del lodo), agua de adhesión y capilar (alrededor de 22%) y, agua interna y de adsorción (alrededor de 8%). Al aumentar la intensidad de los enlaces, se incrementa el consumo de energía para la separación del agua (CONAGUA 32, 2019).

4.2.6.1 Espesamiento

El primer paso en el tratamiento de lodos es retirar una parte del agua que contienen, el objetivo del espesamiento es incrementar la sequedad (proporción de materia seca) de los lodos sin que este deje de ser un líquido.

Los principales procesos de espesamiento son (Tuset, 2020):

Espesamiento por gravedad: emplea la fuerza de la gravedad. La alimentación al espesador se produce por la zona central, en la parte inferior se recogen los lodos espesados y en la superior queda el sobrenadante. Este sistema se emplea en lodos primarios, físico-químicos y mixtos que decantan por gravedad.

Espesamiento por flotación: el lodo se concentra en la parte superior, por la unión de microburbujas, generalmente de aire, son sólidos en suspensión que acaban siendo menos densos que el agua. Este tipo de sistema está indicado para el espesado de fangos biológicos debido a su baja capacidad de sedimentación.

Espesamiento mecánico: la concentración de lodo se lleva a cabo aumentando las fuerzas gravitacionales.

-Centrifugación: se aplica una fuerza centrífuga que permite la separación. Se emplea principalmente en lodos biológicos. Suelen ser equipos caros que requieren medidas adecuadas de mantenimiento (Figura 47).

-Tambor rotativo: separación por filtración, a través del tambor rotativo. Se emplea en caso de lodos biológicos. Los costos de intervención no son elevados, requieren de poco espacio y no producen olores.

-Mesas espesadoras: la separación se produce por drenaje del agua a través de una cinta horizontal porosa en movimiento. Están indicadas para lodos activos o digeridos.

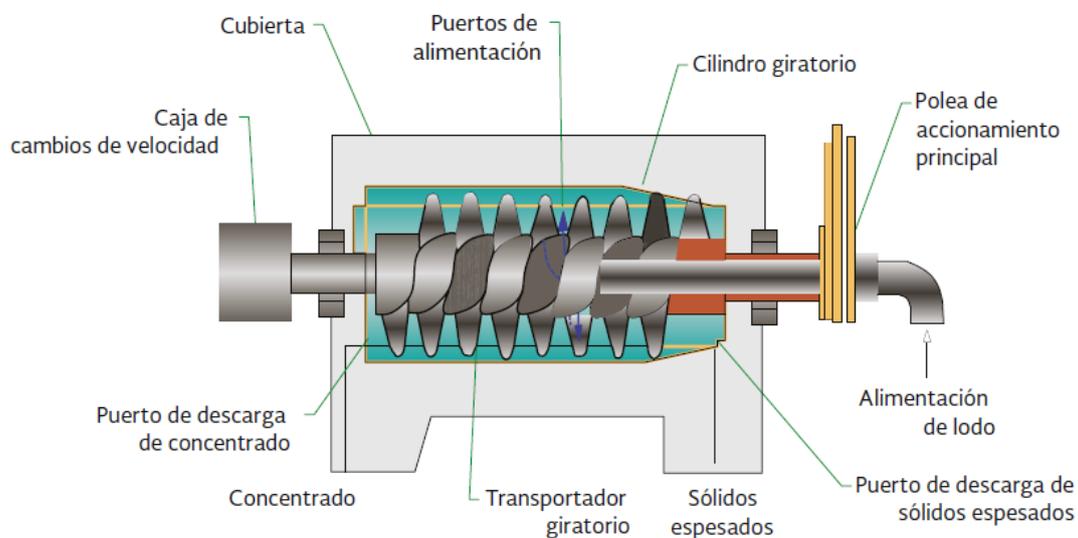


Figura 47. Esquema de una centrífuga de lodos.

Fuente: Metcalf & Eddy, 2003.

4.2.6.2 Estabilización

Los lodos espesados pueden estabilizarse por diversos medios en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Los métodos comúnmente utilizados para la estabilización de lodos son (1) estabilización alcalina, generalmente con cal, (2) digestión anaeróbica, (3) digestión aeróbica y (4) compostaje (Metcalf & Eddy, 2003). Cabe mencionar que no todas las plantas practican la estabilización de lodos después del espesamiento, algunas plantas deshidratan el lodo espesado y luego usan estabilización con cal antes de su eliminación. Otras plantas utilizan la digestión anaeróbica para estabilizar el lodo espesado. A esto le sigue la deshidratación y la disposición final. La selección de los métodos de tratamiento depende de los requisitos reglamentarios para la eliminación final de biosólidos (Riffat, 2013).

Los objetivos de la estabilización de lodos son los siguientes (Metcalf & Eddy, 2003):

- Reducir patógenos.
- Eliminar los olores.
- Inhibir, reducir o eliminar el potencial de putrefacción.

Estabilización alcalina

Se agrega cal viva o cal hidratada al lodo para estabilizarlo. Se agrega cal para elevar el pH a 12 o más. El ambiente alcalino inhibe los microorganismos patógenos y reduce o detiene significativamente la descomposición bacteriana de la materia orgánica en el lodo. Esto evita la producción de olores y la atracción de vectores. Los peligros para la salud no son un problema siempre que el pH se mantenga en este nivel. La cal se puede utilizar para el pretratamiento o postratamiento de lodos (Riffat, 2013).

Este sistema suele usar:

- Depuradoras pequeñas con incorporación de lodos a terrenos naturales o almacenados antes del transporte,
- Depuradoras con necesidad de estabilización adicional,
- Sistema complementario de estabilización durante periodos en que otros sistemas están fuera de servicio.

Normalmente se incorpora antes del secado de lodos, aunque también puede emplearse después, empleando menores cantidades de cal, su dosificación depende de:

- Tipo de lodo,
- Composición química del lodo,
- Concentración del lodo.

Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es el método tradicional para la estabilización de lodos municipales, que resulta en la reducción de sólidos volátiles, producción de biogás como fuente de energía, reducción de patógenos y producción de olores reducida (Figura 48). Los procesos de digestión anaeróbica se operan generalmente a temperaturas mesófilas o termófilas (Riffat, 2013). Consiste en la degradación de la materia orgánica, por la ausencia de oxígeno, liberando energía, metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O), gracias a la acción de algunos tipos de bacterias.

Se produce en 4 etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Estos sistemas se clasifican en: baja carga, alta carga, contacto anaeróbico y con separación de gases.

En este proceso deben controlarse:

- pH
- Temperatura
- Alimentación de fango
- Tiempo de retención
- Producción de gas



Figura 48. Equipo de digestión anaerobia de lodos.

Fuente: AGUASRESIDUALES.INFO, 2020.

Digestión aeróbica

La digestión aeróbica es la conversión biológica de materia orgánica en presencia de aire, generalmente en un reactor de techo abierto. La digestión aeróbica es la estabilización microbiana oxidativa de los lodos. Se basa en el principio de que cuando se dispone de sustratos externos inadecuados, los microorganismos metabolizarán su propia masa celular, dando como resultado una reducción general de los sólidos volátiles (Riffat, 2013).

También puede emplearse para lodos mixtos con un aporte más elevado de oxígeno.

Los factores que afectan a este proceso son:

- Tiempo de retención,
- Temperatura,
- Necesidades de oxígeno y de mezcla.

Compostaje

El proceso de compostaje implica la degradación biológica de la materia orgánica en los lodos para dar un producto final estable. El proceso puede ser aeróbico o anaeróbico. En la mayoría de los casos, se usa compostaje aeróbico, ya que mejora la descomposición de la materia orgánica y da como resultado la temperatura más alta necesaria para la destrucción de patógenos. Puede utilizarse para la estabilización de lodos primarios y lodos activados por residuos, así como para lodos digeridos y deshidratados. El producto final es un material similar al humus que se puede utilizar como fertilizante y acondicionador del suelo.

El compostaje se lleva a cabo en los siguientes pasos (Metcalf & Eddy, 2003):

- a) Pre-procesamiento
- b) Descomposición de alta velocidad
- c) Recuperación de agente de carga
- d) Curación
- e) Post-procesamiento

Es efectivo en la eliminación de contaminantes orgánicos como: hidrocarburos de petróleo, compuestos monoaromáticos, explosivos, clorofenoles, algunos pesticidas y compuestos aromáticos policíclicos.

En el caso de los contaminantes metálicos no son retirados significativamente durante el proceso. Se producen reacciones de oxidación y reducción de los mismos que influyen en la solubilidad, reduciendo su disponibilidad y toxicidad en la fracción sólida. Es necesario un adecuado control, de los parámetros críticos (pH, aireación, humedad) para evitar condiciones anaeróbicas en la masa de compostaje que provoquen aumento de olores.

4.2.6.3 Acondicionamiento

Los lodos y biosólidos son acondicionados químicamente para mejorar sus características de deshidratación. Otros métodos de acondicionamiento son el tratamiento térmico y la congelación-descongelación que se han utilizado de forma limitada o experimental.

Se utilizan productos químicos como los polímeros para mejorar las características de deshidratación de los biosólidos. El acondicionamiento se utiliza antes que los sistemas mecánicos de deshidratación, como las prensas de filtro de cinta (Figura 49), las centrifugadoras, etc. Se agregan a los biosólidos productos químicos como cloruro férrico, cal, alumbre y polímeros, que provocan la coagulación de los sólidos y la liberación de agua absorbida y el contenido de humedad se puede reducir de más del 90% a un rango de 65% a 85%.

Además del acondicionamiento químico, en algunas plantas también se utilizan de forma limitada otros métodos, como el tratamiento térmico o la congelación-descongelación.

Deshidratación de biosólidos

El proceso de deshidratación se utiliza para reducir el volumen de lodos o biosólidos tratados al disminuir el contenido de agua. La deshidratación es una operación de unidad física. El lodo deshidratado es más fácil de manipular y transportar para su disposición final, además minimiza los costos de transporte. Por lo general, se requiere deshidratar antes del compostaje, la incineración y el vertido.

Los métodos de deshidratación se utilizan en varias plantas de tratamiento incluyen centrifugación, filtro prensa de banda o correa, filtro prensa de placa empotrada, cama de secado y lagunas. El secado por calor también se utiliza en algunas instalaciones (Riffat, 2013).

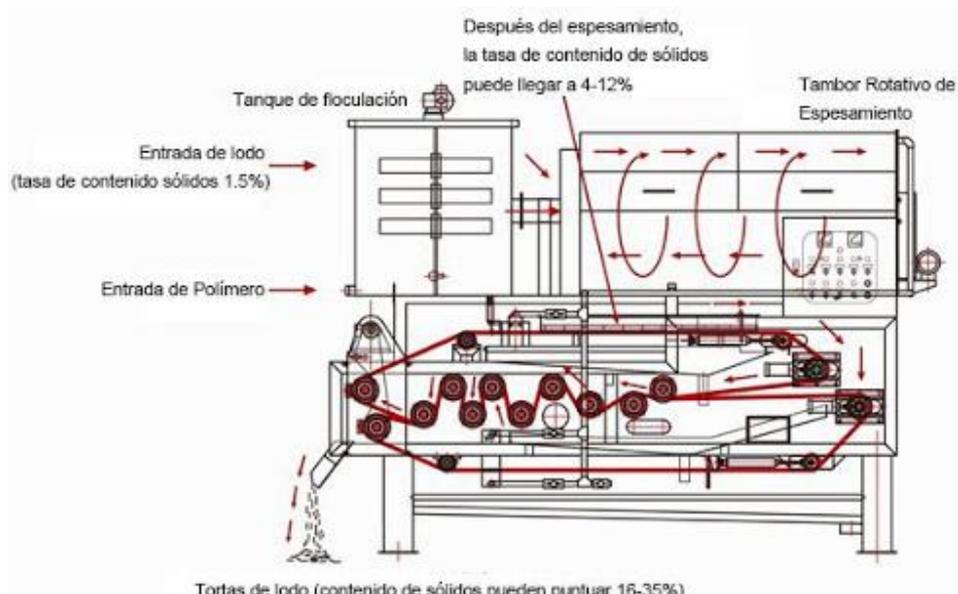


Figura 49. Esquema de un filtro prensa de banda.

Fuente: Haibar, 2020.

4.2.6.4 Eliminación de biosólidos

Después del espesamiento, estabilización y deshidratación, se procede a la eliminación de estos lodos y biosólidos. La eliminación puede ser por incineración o por aplicación en tierra y vertedero. La selección del método de eliminación depende de los requisitos reglamentarios y del grado de tratamiento recibido por el lodo (Riffat, 2013).

Incineración

La incineración es la combustión completa de materia orgánica en el lodo para producir dióxido de carbono, agua y cenizas. La ceniza del producto debe eliminarse de manera adecuada dependiendo de si contiene materiales peligrosos. Los gases generados pasan a través de depuradores y otros dispositivos de control de contaminación de aire antes de liberarlos a la atmósfera.

Las ventajas de la incineración son las siguientes (Metcalf & Eddy, 2003):

- Se logra la máxima reducción de volumen.
- Se destruyen patógenos y compuestos tóxicos.
- Existe potencial para la recuperación de energía.

Las desventajas incluyen las siguientes:

- Los costos de capital y operativos son altos.
- Pueden producirse residuos peligrosos como subproducto.
- La emisión de contaminantes atmosféricos es una preocupación importante.

Métodos de disposición en tierra

Los biosólidos se pueden depositar en la tierra de varias formas, incluida la aplicación a la tierra, el vertedero y la reutilización beneficiosa. La aplicación a la tierra

puede ser en (1) tierras agrícolas, (2) tierras forestales, (3) tierras perturbadas o (4) un sitio de disposición de tierras.

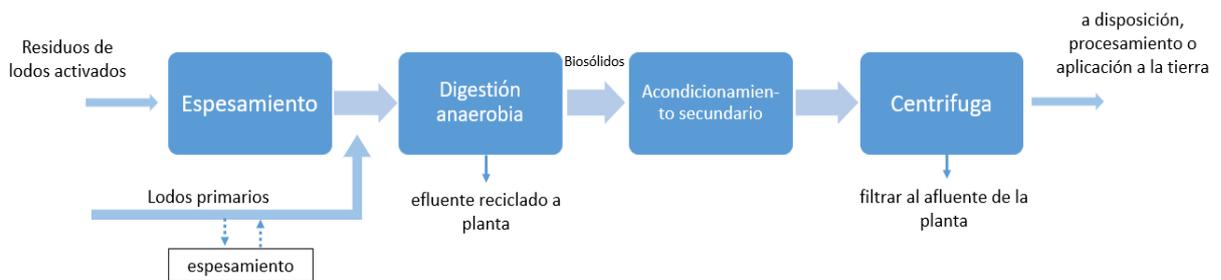
El reciclaje de biosólidos mediante la aplicación al suelo tiene varias ventajas (U.S. EPA, 2000):

- Los biosólidos proporcionan nutrientes esenciales, como nitrógeno y fósforo, a las plantas. También contienen otros micronutrientes, por ejemplo: níquel, zinc y cobre. Pueden servir como alternativa a los fertilizantes químicos.
- Los nutrientes de los biosólidos están presentes en forma orgánica. Se liberan lentamente a las plantas y son menos susceptibles a la escorrentía.
- Los biosólidos mejoran la textura del suelo y la capacidad de retención de agua. Pueden mejorar el crecimiento de las raíces y aumentar la tolerancia a la sequía de la vegetación.
- Los biosólidos se pueden utilizar para estabilizar y revegetar tierras afectadas por actividades de minería, dragado y construcción, así como por incendios y deslizamientos de tierra.
- Los biosólidos se utilizan en la silvicultura para aumentar la productividad forestal al acelerar el crecimiento de los árboles, especialmente en suelos marginalmente productivos.

La selección del método de eliminación y el sitio está dictada por las regulaciones locales y estatales, así como el grado de tratamiento recibido en el lodo. La siguiente sección mostrará la normatividad aplicada en México.

A continuación, se presentan algunos tipos de procesos de tratamiento de lodos (Figura 50).

Tipo 1:



Tipo 2:



Figura 50. Flujos de tratamiento de lodos y su disposición.

Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy, 2003

Tipo 3:



Tipo 4:



Figura 51. Continuación. Flujos de tratamiento de lodos y su disposición.

Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy, 2003

4.3 NORMATIVIDAD NACIONAL APLICADA A LOS PARÁMETROS DEL INFLUENTE Y EFLUENTE DE CADA ETAPA DE PTAR.

En la siguiente sección se mostrarán algunas tablas presentes en la NOM-001, NOM-003 y NOM-004 de SEMARNAT, que establecen los límites máximos permisibles en distintos casos.

La NOM-001-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en bienes nacionales como se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Límites máximos permisibles básicos de contaminantes promedio mensual y diario para descarga.

URA = Uso en Riego Agrícola; UPU= Uso Público Urbano; R= Recreación; HN= Humedales Naturales; EPNYO= Explotación pesquera, navegación y Otros usos. P.M = Promedio Mensual; P.D = Promedio Diario

Parámetro (mg/L)	Ríos				Embalses naturales y artificiales			
	URA		UPU		URA		UPU	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Grasas y Aceites	15	25	15	25	15	25	15	25
SST	150	200	75	125	75	125	40	60
DBO ₅	150	200	75	150	75	150	30	60
NT	40	60	40	60	40	60	15	25
PT	20	30	20	30	20	30	5	10

Fuente: Adaptación NOM 001-SEMARNAT,1996.

Tabla 8. Continuación. Límites máximos promedio de contaminantes mensual para descarga.

URA = Uso en Riego Agrícola; UPU= Uso Público Urbano; R= Recreación; HN= Humedales Naturales; EPNYO= Explotación pesquera, navegación y Otros usos. P.M = Promedio Mensual; P.D = Promedio Diario

Parámetro (mg/L)	Aguas costeras				Suelos	
	EPNYO		R		HN	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Grasas y Aceites	15	25	15	25	15	25
SST	150	200	75	125	75	125
DBO ₅	150	200	75	150	75	150
NT	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
PT	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Fuente: Adaptación NOM 001-SEMARNAT,1996.

Los límites máximos permisibles de contaminantes para aguas residuales tratadas dirigidas a reúso en servicios al público son establecidos en la Tabla 9 de la NOM-003-SEMARNAT-1996.

Tabla 9. Límites máximos permisibles de contaminantes para agua de reúso.

Promedio mensual					
Tipos de reúso	Coliformes fecales	Huevos de Helminto	Grasas y aceites	DBO ₅	SST /
	NMP/100 ml	h/L	mg/L	mg/L	mg/L
Servicios al público con contacto directo	240	≤ 1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	1,000	≤ 5	15	30	30

4.3.1 Normatividad de disposición de lodos aplicada en México.

Los lodos producidos en una planta de tratamiento deben cumplir principalmente con dos Normas Oficiales Mexicanas. En la NOM-004- SEMARNAT-2002 se especifican los límites máximos permitidos de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final, mientras que en la NOM-083-SEMARNAT-2003 se especifican las características de diseño, construcción y operación del sitio de disposición.

A continuación, se presentan tres Tablas (10, 11 y 12) con la cantidad de metales pesados, patógenos y parásitos, permisible en lodos de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002.

Tabla 10. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos.

CONTAMINANTE (determinados en forma total)	EXCELENTES mg/kg en base seca	BUENOS mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1 200	3 000
Cobre	1 500	4 300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2 800	7 500

Mientras que la Tabla 11 se muestran las clases de lodos y los límites máximos de contaminantes presentes en estos.

Tabla 11. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos

CLASE	INDICADOR BACTERIOLÓGICO DE CONTAMINACIÓN	PATÓGENOS	PARÁSITOS
		Coliformes fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella spp.</i> NMP/g en base seca
A	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1 ^(a)
B	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

(a) Huevos de helmintos viables

NMP: número más probable

El aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo y clase, como se especifica en la Tabla 12 y un contenido de humedad hasta el 85%.

Tabla 12. Aprovechamiento de biosólidos.

TIPO	CLASE	APROVECHAMIENTO
EXCELENTE	A	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación. • Los establecidos para clase B y C
EXCELENTE O BUENO	B	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación. • Los establecidos para clase C
EXCELENTE O BUENO	C	<ul style="list-style-type: none"> • Usos forestales. • Mejoramientos de suelos. • Usos agrícolas.

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.1 DATOS OBTENIDOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL "A".

La Figura 4 presenta un proceso de tratamiento de agua residual municipal real basado en una serie de operaciones unitarias y procesos biológicos para llevar a cabo la completa depuración de los contaminantes de tipo orgánico en las aguas residuales. El sistema se esquematiza en las siguientes etapas:

- PRETRATAMIENTO: cribado de desbaste, cribado grueso y cribado fino y desarenado,
- TRATAMIENTO PRIMARIO: caja de distribución y sedimentador primario
- TRATAMIENTO SECUNDARIO: Bioreactor (Bio P), lodos activados y clarificadores secundarios,
- TRATAMIENTO TERCIARIO: desinfección (Canal UV).
- TRATAMIENTO DE LODOS: digestión anaerobia y deshidratado (decantadoras).

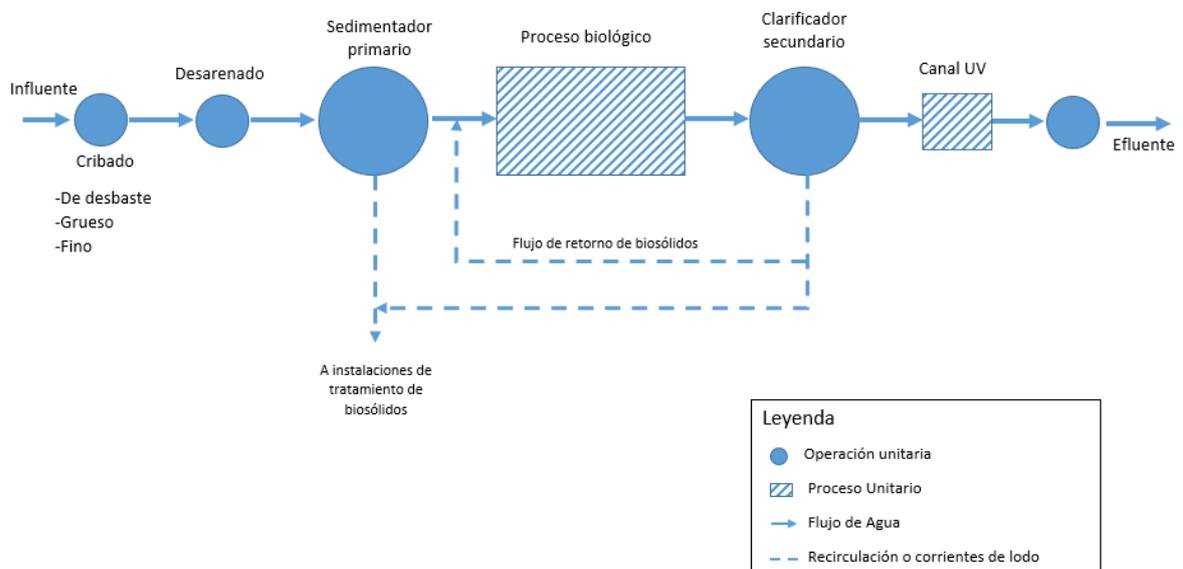


Figura 4. Tren de tratamiento de agua residual de la Planta de Tratamiento "A".

Fuente: PTAR A, 2012.

De acuerdo al tren de tratamiento de agua residual "A", serán mostradas las bases de diseño de cada equipo, así como los flujos y las características de éstos.

Las bases de diseño de cada equipo se realizaron de acuerdo a las características del influente y efluente que se desea obtener, cabe mencionar que no todas las corrientes del proceso se presentan por motivos de privacidad. Sin embargo, la información mostrada es la más representativa, la cual permite expresar y conocer las propiedades en cada etapa de tratamiento y equipo.

Tren de tratamiento

El influente de agua residual domestica del estado de Morelos, ingresa a la PTAR “A” mediante la caja receptora que consta de las siguientes características (Tabla 13):

Tabla 13. Bases de diseño de caja receptora.

INFLUENTE	
Caja receptora	
Flujo máximo de diseño	1700 L/s
Número	Uno
Dimensiones	4.65 m A x 4.9 m L x 1.45 m H
Volumen	31.9 m ³
Material	Concreto

Fuente: PTAR A, 2012.

Pasando la caja receptora, el agua residual ingresa a la etapa de pretratamiento donde son utilizados los procesos: cribado de desbaste, cribado grueso, cribado fino y desarenado con las bases de diseño presentes en la Tabla 14.

Tabla 14. Bases de diseño del pretratamiento.

PRETRATAMIENTO			
Cribado de desbaste		Cribado grueso	
Número	Uno	Tipo de criba	Vertical a 75°
Operación	Manual	Número total de equipos	Dos - Operación y Relevó
Tipo	Rejilla	Fuerza	460 V / 60 Hz / 3 fases
Separación de barras	150 mm	Potencia	2.2 HP (3 kW)
Material	Acero al carbón / inoxidable	Material	Acero Inoxidable 304
		Separación de barras	25 mm
		Flujo de diseño	criba 1,350 L/s
		Factor de diseño (basuras)	22.44 cm ³ /m ³
		Producción basuras – flujo normal	1.45 m ³ /d
		Producción basuras – flujo máximo	2.62 m ³ /d

Tabla 14. Continuación. Bases de diseño del pretratamiento.

PRETRATAMIENTO			
Cribado fino		Desarenado	
Número	Dos – Operación y Relevó	Número	Dos - Operación y Relevó
Tipo	Placa perforada	Tipo	Desarenador rectangular aireado
Material	Acero Inoxidable 304	Flujo medio	desarenador 750 L/s
Fuerza	460 V / 60 Hz / 3 F	Flujo máximo	desarenador 1350 L/s
Motor criba	1.1 HP (1.5 kW)	Carga de superficie – diseño	0.037 m ³ /m ² s
Motor cepillo	0.5 HP (0.75 kW)	Longitud	15.25 m
Flujo máximo diseño	criba 1,350 L/s	Volumen	232 m ³
Factor de diseño (basuras)	59.85 cm ³ /m ³	Tiempo de retención	5.16 min
Producción basuras – flujo normal	3.78 m ³ /d	Tamaño de partícula	0.208 mm
Producción basuras – flujo máximo	6.98 m ³ /d	Factor de producción de arenas	37.41 cm ³ /m ³
Generación de arenas			
Flujo medio		2.42 m ³ /d	
Flujo máximo		4.36 m ³ /d	
Aire a desarenadores		376.5 m ³ /h (161.6 scfm)	

El tratamiento primario consta de una caja de distribución que reparte el agua a los siguientes cuatro sedimentadores primarios, la Tabla 15 muestra las bases de diseño de estos equipos.

Tabla 15. Bases de diseño del tratamiento primario.

TRATAMIENTO PRIMARIO			
Caja de distribución		Sedimentador primario	
Número	Uno	Número	Cuatro
Tipo	Caja repartidora	Tipo	Cuadrados
Flujo de agua / sedimentador	187.5 L/s a flujo promedio	Flujo de agua clarificada	unidad 187.5 L/s a flujo promedio
	337.5 L/s a flujo máximo	Dimensiones	21.34 m L x 21.34 m A
Dimensiones	6.15 m A x 6.15 m L x 1.45 m H ₂ O	Volumen	1146.6 m ³
Volumen	54.84 m ³	Superficie / sedimentador (diseño)	441.0 m ²
Material	Concreto	Tasa de derrame	36.7 m ³ /m ² d
		Tasa de derrame / flujo máximo	66.1 m ³ /m ² d
		Lodos de Purga	489.8 m ³ /d (122.47 m ³ /d por sedimentador)

La PTAR “A” utiliza el proceso de lodos activados para después pasar el agua a clarificadores secundarios, la Tabla 16 presenta las bases de diseño de esta etapa de tratamiento. Donde ocupa un reactor llamado Bio P.

Tabla 16. Bases de diseño del tratamiento secundario

TRATAMIENTO SECUNDARIO			
Lodos activados		Clarificador secundario	
Reactores Bio P		Número	Dos
Número	Dos	Tipo	Circular de tracción central
Tipo	Rectangular	Flujo de agua clarificada / unidad	375 L/s a flujo promedio
Dimensiones	25.3 m L x 21.3 m A x 5.0 m H	Tasa de derrame	23.3 m ³ /m ² d
Volumen	2,700 m ³	Tasa de derrame / flujo máximo	42.0 m ³ /m ² d
TRH a flujo medio (375 L/s)	2.0 h	Superficie / clarificador (diseño)	1,385 m ²
TRH a flujo max. (675 L/s)	1.1 h	Diámetro	42.0 m
Reactores de lodos activados		Tasa de recirculación	80 % (0.8) Q _{RAS} /Q _m
Unidades	Dos	Flujo de recirculación / unidad	300 L/s a flujo promedio
Volumen / reactor	9,435 m ³ (volumen aerobio + volumen Bio P)	Carga de sólidos (flujo medio)	5.0 kg SST/m ² h
Material	Concreto	Lodos de Purga	8,830 kg SST/d
F/M	0.23 kg DBO ₅ /kg SSLM-d		
SSLM	2,850 mg/L		
WAS total	8,830 kg SST/d		
Volumen total WAS	1,032 m ³ /d		
Requerimiento de oxígeno / DBO ₅	1.1 kg O ₂ /kg DBO ₅ removida		
AOR total	704.8 kg O ₂ /h		
SOR total	1,349.6 kg O ₂ /h		
Aire suministrado total	17,036 m ³ /h (10,080.6 scfm)		
Aire / reactor	8,119.6 m ³ /h (4,804.5 scfm)		
Aire para mezcla mínima / reactor	3,209.8 m ³ /h (1,899.3 scfm)		
Aire mezcla / unidad de volumen	29.1 m ³ /m ³		
Aire / carga removida	32.5 m ³ /kg DBO ₅		

AOR- Necesidad Reales de Oxígeno (*actual oxygen requirements*).

SOR – Requisitos de Oxígeno Estándar (*standard oxygen requirements*).

La etapa de tratamiento terciario está compuesta por un canal de UV, la siguiente tabla (17) describe las bases de diseño del canal y su sistema.

Tabla 17. Bases de diseño del tratamiento terciario.

TRATAMIENTO TERCIARIO			
CANAL UV		Sistema UV	
Número	Uno	Número	Dos
Tipo	Rectangular-serpentin	Número de módulos	Seis
Dimensiones Cuatro secciones :	21.3 m L x 3.05 m A x 2.2 m H	Lámparas / módulo	Dieciocho
Volumen	576.9 m ³	Total lámparas	108
TRH a flujo medio (750 L/s)	12.8 min	Potencia	48.5 HP (65 kW)
TRH a flujo max. (1350 L/s)	7.12 min	Fuerza	460 V/ 60 Hz / 3F
Material	Concreto		

La Tabla 18 expone las bases de diseño de la etapa de tratamiento de lodos, la cual está constituida por el proceso de digestión anaerobio y decantación.

Tabla 18. Bases de diseño del tratamiento de lodos.

TRATAMIENTO DE LODOS			
Digestor anaerobio de lodos		Decantadora	
Número	1	Número	Uno
Tipo	anaerobio	Motor primario	100 HP (75 kW)
Dimensiones	26.0 m Diámetro x 10 m H ₂ O	Motor secundario	20 HP (15 kW)
Volumen	5,300 m ³	Motores lubricación/enfriamiento	0.67 HP (0.5 kW) / 0.5 HP (0.37 kW)
Tiempo de retención	17 días	Tipo	Centrífuga
Aplicación	estabilización de lodos espesados	Conexión eléctrica	460 V/ 60 Hz / 3F
Material	concreto	Control	Manual / Auto

Dadas las características de cada equipo en el proceso de tratamiento, se describen las propiedades del influente y efluente en cada nivel de tratamiento recopiladas de la planta de tratamiento.

La Tabla 19, muestra las corrientes de flujo, parámetros y comentarios en cada etapa de tratamiento, así como de los equipos más importantes, es decir, se presentan las entradas y salidas de cada nivel de tratamiento. Las características del influente a la PTAR, las propiedades en la salida del tratamiento primario, los rasgos de la corriente de salida del tratamiento secundario, y por lo tanto las cualidades de efluente de la PTAR al río. De la misma forma los flujos de las etapas de tratamiento para los lodos.

Tabla 19. Corrientes de flujo y concentración de parámetros en cada etapa de tratamiento de la Planta de Tratamiento “A”.

		INFLUENTE	PRETRATAMIENTO				TRATAMIENTO PRIMARIO	
Nombre de la corriente y descripción		EMISOR	Influente a Criba de Gruesos Manual	Influente a Criba Gruesa Automática	Influente a Criba Fina Automática	Efluente de Desarenadores a Caja Repartidora	Alimentación a Sedimentadores Primarios	Efluente de Sedimentadores Primarios
		-	-	x Equipo	x Equipo	-	x Línea	x Línea
Fluido		Agua residual	Agua residual	Agua residual	Agua residual	Agua residual	Agua residual	Agua residual
Flujo diario	m³/d	64,800.00	64,800.00	64,800.00	64,800.00	68,849.30	16,915.70	15,705.20
Flujo mínimo	Lps	400	400	400	400	416.6	104.1	100
Flujo medio	Lps	750	750	750	750	783.1	195.8	187.4
Flujo máximo	Lps	1,700.00	1,350.00	1,350.00	1,350.00	1,383.10	345.8	335.4
Masa líquida	Ton/d	64,798.00	64,798.00	64,798.00	64,798.00	68,847.20	16,915.20	15,704.70
Presión Manométrica	kg/cm²	Atmosférica	Atmosférica	Atmosférica	Atmosférica	Atmosférica	Atmosférica	Atmosférica
DBO₅	mg/L	275	275	275	275	275	275	192.5
SST	mg/L	275	275	275	275	275	275	123.8
SSV	mg/L	206.3	206.3	206.3	206.3	206.3	206.3	92.8
N- Total	mg/L	48	48	48	48	48	49.8	52
P- Total	mg/L	9	9	9	9	9	10	9.7
Coliformes	NMP / 100 mL	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07
Grasas y Aceites	mg/L	50	50	50	50	50	50	40
Temperatura	°C	20	20	20	20	20	20	20
pH	u.s.	7.0 - 8.0	7.0 - 8.0	7.0 - 8.0	7.0 - 8.0	7.0 - 8.0	7.0 - 8.0	7.0 - 8.0
Densidad	kg/m³	1,000.00	1,000.00	1,000.00	1,000.00	1,000.00	1,000.00	1,000.00
Viscosidad	centipoise	1	1	1	1	1	1	1
Comentario			Se eliminan 0.26 m³/d de basuras mayores	Se eliminan 1.45 m³/d de basuras	Se eliminan 3.78 m³/d de residuos finos	Se eliminan 2.42 m³/d de arenas	Disminución de masa líquida, DBO ₅ , SST, SSV, grasas y aceites.	

Fuente: PTAR A, 2012.

Tabla 19. Continuación. Corrientes de flujo y concentración de parámetros en cada etapa de tratamiento de la Planta de Tratamiento "A".

Nombre de la corriente y descripción		TRATAMIENTO SECUNDARIO					T. T	EFLUENTE
		Alimentación a reactor	Licor Mezcla a Clarificadores Secundarios	Efluente de Clarificadores Secundarios	Recirculación de Lodos (RAS)	Recirculación a reactor	Agua Tratada a Desinfección	Agua Tratada al Río
		x Línea	x Línea	x Línea	x Línea	x Línea	-	-
Fluido		Agua residual	Lodos al 0.285%	Agua Tratada	Lodo al 0.85%	Lodo al 0.85%	Agua Tratada	Agua Tratada
Flujo diario	m³/d	32,390.60	58,310.60	32,390.60	25,920.00	24,967.20	64,781.10	64,540.60
Flujo mínimo	Lps	187.4	487.4	187.4	300	144.5	374.9	373.5
Flujo medio	Lps	374.9	674.9	374.9	300	289	749.8	747
Flujo máximo	Lps	670.7	970.7	670.7	300	300	1,341.40	1,344.60
Masa líquida	Ton/d	32,389.60	58,339.70	32,390.60	25,920.00	24,967.20	64,781.10	64,540.63
Presión Manométrica	kg/cm²	Atmosférica	Atmosférica	Atmosférica	0.85	0.85	Atmosférica	Atmosférica
DBO₅	mg/L	192.5	1,596.00	20	4,788.00	4,788.00	20	20
SST	mg/L	123.8	2,850.00	20	8,550.00	8,550.00	20	20
SSV	mg/L	92.8	1,995.00	14	5,985.00	5,985.00	14	14
N- Total	mg/L	52	239.4	12.48	718.2	718.2	12.5	12.5
P- Total	mg/L	9.7	119.7	4.54	359.1	359.1	4.5	4.5
Coliformes	NMP / 100 mL	1.00E+07	9.00E+06	1.00E+06	9.00E+06	9.00E+06	1.00E+06	1.00E+03
Grasas y Aceites	mg/L	40	20	10	20	20	10	10
Temperatura	°C	20	20	20	20	20	20	20
pH	u.s.	7.0 - 8.0	7.0 - 8.0	7.0 - 8.0	7.0 - 8.0	7.0 - 8.0	7.0 - 8.0	7.0 - 8.0
Densidad	kg/m³	1,000.00	1,000.50	1,000.00	1,000.00	1,000.00	1,000.00	1,000.00
Viscosidad	centipoise	1	1	1	5	5	1	1

Fuente: PTAR A, 2012

Tabla 19. Continuación. Corrientes de flujo y concentración de parámetros en cada etapa de tratamiento de la Planta de Tratamiento "A".

TRATAMIENTO DE LODOS							
Nombre de la corriente y descripción		Purga de Lodos Primarios	Lodos Primarios a Espesador a Gravedad	Purga de Lodos Espesados de Primario	Lodos Espesados a Digestor /	Lodos de Espesamiento	Lodo Deshidratado
		x Línea	x Equipo	x Línea	Decantadora	-	-
Fluido		Lodos al 2.0%	Lodos al 2.0%	Lodos al 4%	Lodos al 4%	Lodos al 6%	Lodos al 25%
Flujo diario	m³/d	122.5	245.1	122.5	245.1	303.3	49.79
Flujo mínimo	Lps	1.42	2.84	2.84	5.67	3.5	0.58
Flujo medio	Lps	2.84	5.67	5.67	11.34	7	1.15
Flujo máximo	Lps	3.55	7.09	5.67	11.34	7	1.15
Masa líquida	Ton/d	122.6	245.173	122.71	245.42	25,920.00	49.865
Presión Manométrica	kg/cm²	Atmosférica	Atmosférica	0.65	0.65	Atmosférica	Atmosférica
DBO₅	mg/L	16,000.00	16,000.00	32,000.00	32,000.00	52,200.00	42,675.00
SST	mg/L	20,000.00	20,000.00	40,000.00	40,000.00	60,000.00	250,000.00
SSV	mg/L	15,000.00	15,000.00	30,000.00	30,000.00	43,500.00	142,250.00
N- Total	mg/L	750	750	1,500.00	1,500.00	4,370.00	4,267.50
P- Total	mg/L	150	150	300	300	1,745.00	2,133.75
Coliformes	NMP / 100 mL	9.00E+06	9.00E+06	9.00E+06	8.10E+06	8.10E+06	NA
Grasas y Aceites	mg/L	700	700	1,400.00	1,400.00	127.3	NA
Temperatura	°C	20	20	20	20	20	30 - 35
pH	u.s.	7.0 - 8.0	7.0 - 8.0	7.0 - 8.0	7.0 - 8.0	6.0 - 8.0	6.0 - 8.0
Densidad	kg/m³	1,000.50	1,000.50	1,001.50	1,001.50	1,001.00	1,001.50
Viscosidad	centipoise	5	5	15	15	20	200
Comentario	Para efectos de flujo hidráulico, se considera una purga de 12 h/d						

Fuente: PTAR A, 2012

De la misma forma, la Tabla 20 permite conocer la cantidad de contaminantes en el influente y el efluente de algunas plantas de tratamiento de agua residual de México, así como el tipo de tratamiento que utilizan.

Tabla 20. Concentración de parámetros evaluados en las muestras de agua del influente y efluente en algunas PTAR de México expresado en concentración.

Tipo de PTAR	Conductividad μS	SDT* SST*	NT*	PT*	DQO*	Coliformes
Anaerobio con aireación superficial	NA	0.28	4.5	1.03	99.4	3
	NA	0.35	19.1	9.89	460.0	2400
Biodiscos	NA	0.50	5.9	0.80	40.1	4050
	0.44	0.78	25.4	6.36	1094.6	13675
Filtros biológicos o percoladores	NA	0.03	3.8	0.81	39.0	6.16
	NA	0.48	22.3	10.44	462.17	2400
Lagunas Aireadas	1.20	0.60	10.0	4.70	0	667
	1.13	0.55	22.0	5.10	382.0	2400
Laguna de Oxidación	1.55	0.77	44.0	5.43	632.0	357
	1.57	0.77	15.0	6.66	1780.0	2400
Lodos Activados	1.00	0.47	10.0	3.96	477.0	1648
	1.30	0.65	24.0	7.85	1067.0	2400
Tanque de oxidación biológica	1-00	0.58	36.0	0.57	0.0	128
	1.45	0.73	32.0	9.27	524.0	325

Influente: Líneas sombreadas Efluente: Líneas no sombreadas *PPM=parte por millón =mg/L

Fuente: Adaptación De la Vega, 2012.

6. RESULTADOS

Con la información general de un proceso de tratamiento de agua residual, niveles, tipos de tratamiento, descripción de algunos equipos y las características del influente y efluente, la siguiente matriz (Tabla 21) presenta una combinación de procesos y operaciones unitarias utilizadas en las PTAR.

Tabla 21. Matriz de combinaciones de niveles y tipos de tratamiento.

Nivel de tratamiento \ Tipo de tratamiento	Primario	Secundario	Terciario
Físico	<ul style="list-style-type: none"> • Cribas Finas • Criba Gruesas • Filtración 	Sedimentación	<ul style="list-style-type: none"> • Filtración por membrana • Cámara de arena
Biológico	-----	<ul style="list-style-type: none"> • Procesos de crecimiento suspendido (aeróbico y anaeróbico) • Procesos de crecimiento unidos (aeróbico y anaeróbico) • Estanques y lagunas • Biorreactores con membranas • Rayas de aire 	Adsorción con carbón activado
Químico	Sedimentación con coagulantes y floculantes.	Clarificador con floculantes	<ul style="list-style-type: none"> • Intercambio iónico • Cloración • Ozonación • Desinfección Ultravioleta

Los tratamientos de agua trabajan en conjunto para obtener la menor cantidad de contaminantes, la matriz anterior (Tabla 21) permite acceder a la combinación de tipos y niveles dependiendo de las características del influente y el destino del efluente.

Entre los parámetros más destacados a analizar en los datos recolectados de la Tabla 19, son DBO₅, SST y SSV en el agua residual.

DBO₅

- Se mantiene constante desde el ingreso a la PTAR (emisor) hasta que sale de los sedimentadores primarios, con una remoción del 30%.
- La cantidad en el influente del reactor a la recirculación (RAS) aumenta hasta 24 veces más.
- La cantidad en el influente de clarificadores secundarios hasta el agua tratada final (efluente de tratamiento terciario, TT), se removió alrededor del 89% y un 92% desde el emisor hasta éste.

SST

- La primera remoción significativa fue después del sedimentador primario, con alrededor del 54%.
- Vuelve a incrementar la cantidad, en la corriente de recirculación de lodos (RAS) hasta 69 veces más.

- Además, la remoción de cantidad en la corriente del influente del reactor hasta el efluente final (desbordamiento a un cuerpo de agua), es de 83% y de la cantidad inicial (emisor) al cuerpo de agua receptor de un 92%.

SSV

- La diferencia notoria de cantidad removida se encuentra en la salida de la corriente del sedimentador primario, con alrededor del 55%.
- Mientras aumenta hasta 64 veces su cantidad en el RAS.
- Además, finaliza con la remoción del influente del reactor al efluente al cuerpo de agua con un 84% y un 93% de remoción del afluente (emisor) hasta el efluente final.

Lo anterior permite tener una idea de cómo es que se realizan las funciones en los equipos de cada etapa y la importancia de los clarificadores al separar los lodos, requiriendo un tratamiento igual de importante y extenso.

7. DISCUSIÓN

Las Plantas de Tratamiento de Agua Residual son una mezcla dirigida de operaciones y procesos unitarios de origen físico, químico y biológico, o combinación de ellos, que están envueltos por fenómenos de transporte y manejo de fluidos. Se componen de etapas y niveles que tienen el objetivo de disminuir y/o separar aquellas sustancias y partículas no deseadas en el agua, llamados contaminantes (luego de haber sido utilizadas en distintas actividades humanas), para subsecuentemente ser reusadas.

Anteriormente se pensaba que al realizar un tratamiento primario no se podían emplear productos químicos sino hasta el tratamiento terciario, en la actualidad se sabe que en los tres niveles se pueden utilizar los tres tipos de tratamiento, es decir, es posible emplear y adecuar procesos físicos, biológicos y químicos en el tratamiento primario, secundario y terciario.

Con ello, en las Tablas 19 y 20, los efluentes de las plantas evaluadas en general cumplen satisfactoriamente con los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en bienes nacionales, entre los que podemos destacar son los parámetros DQO, PT, NT, SST y coliformes, que tienen un contenido mucho menor, mostrando que las capacidades de remoción de estas son aceptables dentro de los límites permisibles nacionales, basada en las normas oficiales mexicanas 001, 002 y 003.

Así, la investigación y comparación de datos experimentales concluye con los siguientes puntos:

- El proceso de tratamiento de aguas residuales requiere el uso de los procesos físicos, químicos y biológicos. Comúnmente se describen como, procesos físicos y separación de sólidos de mayor tamaño para la etapa de pre y tratamiento primario; uso de procesos para eliminar material biológico y orgánico para el tratamiento secundario; y procesos químicos para perfeccionar el agua, removiendo completamente cualquier contaminante, por muy pequeño que éste sea para el tratamiento terciario. Por lo tanto, dependiendo el proceso, serán los parámetros a controlar. Cabe resaltar que, muchos de éstos se encuentran en el tratamiento secundario, ya que requieren de microorganismos para la remoción de contaminantes.
- Las características y parámetros de los tipos de tratamiento físico, biológico y químico, se establecen como, que el tratamiento físico involucra la eliminación de sólidos, principalmente en suspensión por fuerzas físicas simples; el tratamiento químico implica la adición de sustancias para lograr la conversión o disminución de contaminantes a través de reacciones químicas; mientras el tratamiento biológico realiza la conversión de contaminantes con la ayuda de microorganismos. Así, las etapas y niveles de tratamiento trabajan en conjunto, como se muestra en la Tabla 21. Sin embargo, las tecnologías han ido evolucionando para emplear los tres procesos en un mismo tratamiento o equipo, sin importar la etapa en la que se encuentre y dependiendo las características del influente y efluente requerido.

- Las características del influente a la PTAR serán de acuerdo a los usos dados al agua, mientras que, para el efluente, sus características deben cumplir con las normas y leyes gubernamentales, sea cual sea la siguiente actividad destinada. Por lo que, el tren de tratamiento de la planta de tratamiento “A” cumple con la cantidad permisible en su efluente. De la misma forma que las demás plantas vistas.
- Se describen los equipos y tecnologías más usados que ocupan los niveles de tratamiento, como es el caso del tratamiento secundario, que principalmente se hizo referencia al proceso de lodos activados. Cabe mencionar que la descripción del proceso anaerobio y aerobio que conlleva cada equipo (y el de todas etapas) se realizó de forma general debido a la extensa información que se puede obtener de ellos.
- Se logró realizar la comparación de bases de diseño y características de influente y efluente de cada nivel de tratamiento con datos reales y en funcionamiento de una PTAR Municipal, esta comparación se basó en los flujos y parámetros de cada corriente en el proceso de tratamiento de la PTAR “A”, además se hace referencia a las bases de diseño de los equipos involucrados en los resultados (Capítulo 5). La comparación confirma que el proceso que se realiza en la planta “A” cuenta con los tres niveles de tratamiento y ello permite obtener un efluente que cumple con los requisitos establecidos en las normas mexicanas para verterse en un cuerpo de agua.

Cabe mencionar que con la obtención de agua purificada o “limpia”, también adquirimos lo no deseado, contenido en los lodos o biosólidos, que requieren de la misma importancia, ya que conllevan un proceso de tratamiento simultáneo al del agua para poder ser desechados o reutilizados, tal como lo marcan las normas oficiales mexicanas e internacionales. Un ejemplo, es el proceso que se lleva a cabo en los lodos de la PTAR “A”, y qué amplía el panorama para visualizar la variedad de corrientes de flujo que nos permitirán ir separando cada uno de los contaminantes, e interpretar datos duros y existentes de flujos, características y procesos que se llevan a cabo en ellos.

La investigación teórica como experimental presentada es un conjunto de información general del tren de tratamiento, parámetros y características de los niveles y procesos de tratamiento de las PTAR, sin embargo, cada etapa puede ser desarrollada y ejemplificada a mayor profundidad, no solo para el tratamiento de agua sino también para los lodos y la separación de los contaminantes que pueden reusados. De la misma forma, existe un gran panorama de los usos que se tienen para el agua residual ya tratada, como se plantea anteriormente, la cual proponemos como otro tema de investigación para futuras generaciones.

8. CONCLUSIONES

La investigación presentada desarrolla y describe el proceso general que conlleva un tren de tratamiento, los parámetros indispensables en el diseño y funcionamiento de los niveles, etapas y equipos usados una Planta de Tratamiento de Agua Residual. Detallando las características que contiene cada nivel: pretratamiento, primario, secundario y terciario, y los procesos: físico, químico y biológico de tratamiento, así como la caracterización general del influente y efluente, y equipos más usados en ellos. Determina las variedades de equipos y tecnologías que dependiendo del tiempo, inversión, tipo de efluente deseado y proceso, se componen de diferentes flujos, espacios y toma de energía para lograr la eficiente separación de una determinada cantidad de contaminantes.

Así se logra representar los parámetros que describen la calidad del influente, como las concentraciones normales de estos en las PTAR, usándose para la comparación con las concentraciones y el proceso de tratamiento de la planta de tratamiento "A" (una planta de tratamiento de agua residual municipal en funcionamiento), donde se asegura que las bases de diseño, equipos y tren de tratamiento separa los contaminantes y/o disminuye sus concentraciones en el efluente de la misma, cumpliendo con la normatividad vigente nacional presentada. Mientras que se confirma que su proceso es afín a la bibliografía encontrada y descrita con anterioridad.

Entre los parámetros que permiten medir la calidad del agua y que se deben controlar en el proceso de tratamiento, ya que permiten obtener información acerca de su estado, son F/M, IVL, tasa de recirculación, TMRC, entre otros, monitoreados en el proceso de tratamiento de secundario (eliminación de materia orgánica).

Igualmente, es de total relevancia que en cada etapa y/o corriente exista un monitoreo de las características de entrada y salida del agua a un equipo, para conocer si se cumple con el efluente deseado.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barrett, L. M. (2015). *Wastewater treatment: Processes, management strategies and environmental/health impacts*. Nova Science Publishers, Inc. ProQuest Ebook Central.
- BELZONA. (2010) *Plantas de Tratamiento de agua residual* PDF. https://www.belzona.com/es/solution_maps/wastewater/money_map.pdf
- Buitrón G. y al. (2018) *Manual técnico sobre tecnologías biológicas aerobias aplicadas al tratamiento de aguas residuales industriales*. RED TRITÓN 316RT0508. PROGRAMA CYTED. PDF
- Cárdenas, C., Perruolo, T., Tarre, Y., Flores, K., Trujillo, A., Saules, L., Araujo, I. & Yabroudi, S. (2006). *Remoción de nutrientes en un reactor discontinuo secuencial*. *Interciencia*, 31(11), pp. 787-793.
- COMMUNITY WATER CENTER (2020) *Guide to Community Drinking Water Advocacy Bacterias Coliformes* PDF. [https://d3n8a8pro7vhmx.cloudfront.net/communitywatercenter/pages/51/attachments/original/1490120342/Coliform_\(espanol\).pdf?1490120342](https://d3n8a8pro7vhmx.cloudfront.net/communitywatercenter/pages/51/attachments/original/1490120342/Coliform_(espanol).pdf?1490120342)
- CONAGUA (2019) *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*, diciembre 2019.
- CONAGUA (2019) *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Pretratamiento y Tratamiento Primario*. Libro 26. PDF. <http://cmx.org.mx/wp-content/uploads/MAPAS%202015/libros/SGAPDS-1-15-Libro26.pdf>
- CONAGUA (2019) *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Tratamiento y Disposición de Lodos*. Libro 32. PDF. <http://cmx.org.mx/wp-content/uploads/MAPAS%202015/libros/SGAPDS-1-15-Libro32.pdf>
- CONAGUA (2019) *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Operación y mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Pretratamiento y Tratamiento Primario* Libro 46. PDF. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro46.pdf>
- CONAGUA (2019) *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales Municipales*. Libro 25. PDF. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>
- CONAGUA (2019) *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Procesos Anaerobios*. Libro 49. PDF. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro49.pdf>
- CONAGUA (2019) *Manual De Operación Y Procedimientos 2019 Apartado Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales (PTAR)*. Gerencia De Programas Federales De Agua Potable Y Saneamiento Programa De Agua Potable, Drenaje Y Tratamiento (Proagua) PDF. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/477346/MOP_PTAR_2019.pdf
- CONAGUA (2020) *Programa Nacional Hídrico 2020-2024*. <https://n9.cl/egg3u>
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM). Art. 27. Reformado el 10 de enero de 1934 (México).
- Condorchem Evitech (2021) *Adsorción en carbón activado para el tratamiento de aguas residuales*. Blog Cordonchem Evitech. <https://condorchem.com/es/blog/adsorcion-en-carbon-activado-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales/>
- Doménech J. (2002) *Control de Calidad del Agua*. Sanidad Ambiental Revista Elsevier. *Offarm* Vol. 21. Núm 10.
- FAO (2013) *Informe Sobre Temas Hídricos Núm. 35 Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?* Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma 2013.
- GEDAR (2020) *Bioreactor lecho móvil MBBR*. Gestión de Aguas y Residuos. <https://www.gedar.com/residuales/tratamiento-biologico-aerobio/bioreactor-lecho-movil-mbbr.htm>

- HACH (2015) HACH COMPANY. *Importancia de la medición de Carbono Orgánico Total*. PDF. https://es.hach.com/cms/documents/Drinkingwaterpdf/14797957_DOC040.61.100_62.Jun15_ES.pdf
- HACH (2020) HACH COMPANY. *¿Qué es la conductividad?* https://latam.hach.com/cms-portals/hach_mx/cms/documents/Que-s-la-conductividad-Final.pdf
- HANNA Instruments (2020) *Demanda Química de Oxígeno*. <https://www.hannainst.es/blog/81/demanda-quimica-de-oxigeno>
- Hidritec (2016) Radiación ultravioleta. <http://www.hidritec.com/hidritec/radiacion-ultravioleta>
- Judd S. (2021) *¿Qué son los biorreactores de membrana?* MBR.Judd & Judd Ltd. <https://www.thembrsite.com/what-are-mbrs/>
- LENNTECH (2020) *Micro y ultra filtración*. Tecnología de Membrana. <https://www.lenntech.es/micro-y-ultra-filtracion.htm>
- Lofrano G. & Brown J. (2010) *Wastewater management through the ages: A history of mankind*. Science of The Total Environment Volume 408, Issue 22, Pages 5254-5264.
- Mancipe L., Triviño M. (2018) *Valoración de lodos de planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) como materia prima para la extracción de lípidos en la obtención de biodiesel*. Revista ION: <http://dx.doi.org/10.18273/revion.v31n1-2018012>
- Mannina G., Ekama G., Ødegaard H., & Olsson G. (2018) *Advances in Wastewater Treatment*. First published. IWA Publishing. <http://iwaponline.com/ebooks/book-pdf/518889/wio9781780409719.pdf>
- Mazille F. & Spuhler D. (2020) *SSWM Gestión del Agua y Saneamiento Sostenible. Coagulación, floculación y separación*. <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/coagulaci%C3%B3n-floculaci%C3%B3n-y-separaci%C3%B3n>
- Metcalf & Eddy (2003) *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. 4TH Edition. Mc Graw Hill. 1819 p. p.
- NORMA MEXICANA NMX-AA-029-SCFI-2001 *Análisis De Aguas - Determinación De Fósforo Total En Aguas Naturales, Residuales Y Residuales Tratadas - Método De Prueba*
- NORMA MEXICANA NMX-AA-034-SCFI-2015 *Análisis De Agua - Medición De Sólidos Y Sales Disueltas En Aguas Naturales, Residuales Y Residuales Tratadas – Método De Prueba*
- NORMA MEXICANA NMX-AA-042-SCFI-2015. *Análisis De Agua - Enumeración De Organismos Coliformes Totales, Organismos Coliformes Fecales (Termotolerantes) Y Escherichia Coli – Método Del Número Más Probable En Tubos Múltiples (Cancela A La Nmx-Aa-42-1987)*.
- NORMA OFICIAL MEXICANA NOM 001- SEMARNAT-1996. *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*.
- NORMA OFICIAL MEXICANA NOM 002- SEMARNAT-1996. *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal*.
- NORMA OFICIAL MEXICANA. NOM 003- SEMARNAT-1996. *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público*.
- NORMA OFICIAL MEXICANA NOM 004- SEMARNAT- 2002. *Lodos y biosólidos. - Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*.
- OSE (2012) *Cálculos básicos para operación Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Canelones*. V01. IT2. 19 pp.
- Pérez (2015) *Diseño de un sistema de tratamiento para el agua de alimentación a los calderos en el parque acuático los Elenes del Cartón Guano*. Facultad de Ciencias Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Tesis de Grado. Ecuador. 247 pp.

- Pérez J., Peña E., López R., y Hernández I. (2016). *Metales pesados y calidad agronómica del agua residual tratada*. Idesia (Arica), 34 (1), 19-25. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292016000100003>
- PTAR A (2012). *Planta de Tratamiento de Agua Residual Acapantzingo*.
- PTAR M (2006) *Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales*, Michoacán.
- Qasim, S.R., & Zhu, G. (2018). *Wastewater Treatment and Reuse Theory and Design Examples*, Volume 1 & 2: Post-Treatment, Reuse, and Disposal (1st ed.). CRC Press. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1201/b22366>
- Ramalho R. (2003) *Tratamiento de Aguas Residuales*. Editorial Reverté S.A
- Ramírez E., s. f., *Fundamentos teóricos de lodos activados y aereación Extendida*. Capitulo II. PDF. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018834/MEMORIAS2004/Capitulo1Fundamentosdelprocesodelodosactivados.pdf>
- Riffat R. (2013) *Fundamentals of Wastewater Treatment and Engineering*. Iwa Publising. First Edition 325 pp
- Rodríguez A. (2020) *Tratamiento de Aguas Residuales*. Universidad del Valle. PDF <http://www.ingenieroambiental.com/4014/tratamiento545.pdf>
- Rodríguez D., Serrano H., Delgado A., Nolasco D., Saltiel G. (2020). *De residuo a recurso: Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe*. World Bank, Washington, DC. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/33436>
- Rojas. R (2002) *Curso Internacional "GESTIÓN INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES" 25 al 27 de setiembre de 2002*. Conferencia Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales. Organización Mundial de la Salud <http://files.control-ambiental5.webnode.com.co/200000093-9097e9190c/GESTION%20INTEGRAL%20DEL%20TRATAMIENTO%20AR.pdf>
- Russell D. (2019) *Practical Wastewater Treatment*. Second Edition. Lilburn, Georgia. Global Environmental Operations Inc.
- Ryder, Guy (2017) Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos, UNESCO. Director-General, 2009-2017 (Bokova, I.G.).
- Spellman R. (2011) *Wastewater Operators*. Standard Handbook. Second Edition. Vol II Intermediate Level. 488 pp
- Syed R. & Zhu G. (2017) *Wastewater Treatment and reused. Theory and Design Examples*, Volume 2: Post-Treatment, Reuse, and Disposal. 1st Edition pp745
- Tuset S. (2020) Condorchem Envitech. Blog. *Procesos y Tecnología para el tratamiento de lodos*. <https://blog.condorchem.com/tratamiento-de-lodos/>
- U.S. EPA (2000) *Biosolids Technology Fact Sheet: Land Application of Biosolids*. EPA 832-F-00-064. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, D.C.
- Warkins K. (2006) Informe sobre Desarrollo Humano 2006. *Más allá de la escasez: Poder, pobreza y la crisis mundial del agua*. Publicado para el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) pp 440. PDF

10. BIBLIOGRAFÍA

- Agua y Ambiente (2015) La Revista de Saneamiento Ambiental en México. *Trituradores en el Tratamiento de aguas residuales*. <https://aguayambiente.com/2015/03/16/trituradores-tratamiento-agua-residual/>
- Aguas Industriales (2014) MBR <http://aguasindustriales.es/bioreactor-de-membranas-para-aguas-industriales-la-solucion-cuando-tienes-espacio-y-necesitas-mas-capacidad-en-tu-depuradora/>
- Aguas Industriales (2014) Tratamientos de aguas para Bodegas: *Desinfección mediante radiación ultravioleta en bodegas* <http://aguasindustriales.es/tratamientos-de-aguas-para-bodegas-desinfeccion-mediante-radiacion-ultravioleta-en-bodegas/>
- AGUASRESIDUALES.INFO (2020) Líderes en Información, Formación y Conocimiento para el Sector del Tratamiento del Agua. *Digestión anaerobia*. <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/digestion-anaerobia-de-fangos-de-edar-problemas-y-soluciones>
- AQUAMEX (2020) Especialistas en Tratamiento de agua. *Sistema de Cribado*. <https://www.aquamex.com/sistema-de-cribado/>
- AQUAPROF (2018) *Filtros de carbón activado* <https://www.aquaprof.es/info/osmosis/mantenimiento/filtros/carbon-activado/>
- Ariunbaatar J., Panico A., Esposito G., Pirozzi F. and Lens P. N. L. (2014). *Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste*. *Applied Energy*, 123,143–156.
- Baruth E. (2005) *Water Treatment Plant Design*. American Water Works Association. American Society of Civil Engineers. McGraw-Hill. Fourth Edition. 971 pp.
- Bhadha J., Sexton A., Lang T., Daroub S. (2017). *Capturing Flow-weighted Water and Suspended Particulates from Agricultural Canals During Drainage Events*. J. Vis. Exp. (129). <https://www.jove.com/t/56088?language=Spanish>
- BIOAZUL (2020) *Mbr-Biorreactor De Membrana* <https://www.bioazul.com/mbr-biorreactor-de-membrana/>
- Bioplast depuración (2020) *Contactores biológicos Rotativos CBR* <http://bioplastdepuracion.com/index.php?s=biodiscos#tercera>
- BIOQUIMIA (2022) *Coagulantes*. Maquinaria y productos para tratamiento del agua. España. http://bioquimia.es/64-large_default/coagulantes.jpg
- BossTech (2018) *Tratamiento de agua por intercambio iónico* <https://bosstech.pe/blog/tratamiento-de-agua-por-intercambio-ionico/>
- CALA (2020) *Construcciones Ambientales Latinoamérica S.A.* Separadores de arena.
- CHEMSOL (2020) Chemical Solution. *Sistema Anaerobio*. UASB Y ABR <http://chemsol.com.co/division-ingenieria/agua-residual/sistema-anaerobio/>
- CHEMSOL (2020) Chemical Solution. *Sistema de Lodos Activados* <http://chemsol.com.co/division-ingenieria/agua-residual/sistema-de-lodos-activados/>
- CNDH (2014) *El derecho humano al agua potable y saneamiento*. Primera Edición. México. PDF
- Cohen Y. (2001). *Biofiltration - the treatment of fluids by microorganisms immobilized into the filter bedding material: a review*. *Bioresource Technol.* 77, 257-274.
- CONAGUA (2016) *Lineamientos Técnicos: Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales a Nivel Vivienda en Zona Rural*. PDF https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/152777/LINEAMIENTOS_TRATAMIENTO_AGUAS_NIVEL_VIVIENDA.pdf
- Condorchem Envitech (2019) Smart Ideas for Wastewater and Air Treatment. Ingeniería Ambiental. *Tratamiento De Aguas Residuales, Efluentes Y Aire Al Servicio Del Medio Ambiente*.
- Construcción y vivienda (2020) Agua y Saneamiento *Lodos generados por plantas de tratamiento apuntan a preservar el medioambiente* <https://www.construccionyvivienda.com/2018/01/11/lodos-generados-por-plantas-de-tratamiento-apuntan-a-preservar-el-medioambiente/>

- De la Peña E., Ducci J. y Plascencia V. (2013) *Tratamiento de aguas residuales en México*. Banco Interamericano de Desarrollo. http://www.sagua.org/sites/default/files/documentos/documentos/tratamiento_de_agua_s_residuales_en_mexico.pdf
- De la Vega. M (2012) *Eficiencia en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales*. Contribución a la gestión y desarrollo social. ISBN. Primera Edición. 118 pp.
- Eawag (2020) SFIAS, SSWM. *Anaerobic Baffled Reactor* <https://sswm.info/es/taxonomy/term/3931/anaerobic-baffled-reactor-%28abr%29>
- ERAL (2020) ERAL Chiles S.A. *Equipos* <http://eralchile.com/equipos/clarificadores-espesadores.php>
- ETW INTERNATIONAL (2020) *Reactor UASB*. <https://mx.etwinternational.com/1-15-uasb-reactor-35297.html>
- EXRO (2021) *Soluciones Integrales en Tratamientos de Agua. Clarificación*. <https://www.exroltda.com/>
- Global Water and Energy (2020) *Conceptos básicos y ventajas del tratamiento anaeróbico de aguas residuales. Tratamiento Anaerobio*. Bélgica. <https://www.globalwe.com/es/soluciones/aguas-residuales/tratamiento-anaerobio/>
- GWC (2014) General Water Company Argentina. *Intercambio Iónico*. Artículos del Agua Blog <https://gwc.com.ar/agua/intercambio-ionico/>
- Haibar (2020) Fabricante de equipos de separación de separación de sólidos y líquidos. *Principio de filtro prensa de banda de deshidratación y engrosamiento de tambor*. <http://haibarmachines.com/profile/product-1-1-1-drum-belt-filter-press-principio/149611/0/>
- Hebei Long Zhuo Trade Co. (2021) WasteWater Products. *MBBR media*. <https://www.hblongzhuo.com/mbbr-media/p2/>
- Hidritec (2016) Sistema de Cloración. *Cloración de agua potable*. <http://www.hidritec.com/hidritec/sistemas-de-cloracion>
- IndiaMART (2021) *Advanced Sequential Batch Reactor (Sbr) Technology*
- IngeCivil (2020) Información relacionada a Ingeniería Civil y Construcción. *Tipos de desarenadores que existen*. <https://www.ingecivil.net/2019/05/21/tipos-de-desarenadores-que-existen-conocelos/>
- JUMAPAC (2016) Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Cortázar, GTO. *Planta Insurgentes. Proceso de Tratamiento*. http://jumapac.com/73_planta_insurgentes.html
- Lomelí E. (2011) *Tratamiento de Aguas Residuales Provenientes de Rastro Mediante un Sistema de Reactores Anaerobio y Aerobio con Aireación Intermitente*. Tesis Maestra en Ingeniería. UNAM. México
- Madrid (2006) Fundación Para el conocimiento Madrid Blogs. *El Agua. Reactores biológicos secuenciales (SBR): una tecnología versátil para el tratamiento de aguas residuales industriales*. <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2006/12/01/53336>
- Malina J. F. & Pohland F.G. (1992). *Desing of Anaerobic Processes for the Treatment of Industrial and Municipal Wastes*. Water Quality Managment Library VOL. 7 Technomic. 214 pp.
- Manifestación Ambiental Sin año. *Planta de tratamiento de agua residual Veracruz PDF* <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/ver/estudios/2008/30VE2008HD017.pdf>
- Márquez J. (2018) *Fluido- Dinámica de Lechos Fluidizados. Diseño de un reactor de lecho fluidizado de laboratorio para el estudio de conversión termoquímica de biomasa*. <https://docplayer.es/68825726-Fluido-dinamica-de-lechos-fluidizados-al-conjunto-de-particulas-fluidizadas-se-le-denomina-tambien-lecho-fluidizado.html>
- Márquez M. (2020) *Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente*. Laboratorio de Ingeniería Ambiental. Centro Tecnológico Aragón. PDF https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/M%C3%81RQUEZ%20y%20MART%C3%8DNEZ%202011%20Reactores%20Anaerobios.pdf
- Mazzei (2020) *Proceso de Ozonificación*. Mazzei Injecyor Company. <https://mazzei.net/es/gdt-ozonation-process/>

- Minale M. & Worku T. (2014). *Anaerobic co-digestion of sanitary wastewater and kitchen solid waste for biogas and fertilizer production under ambient temperature: waste generated from condominium house*. International Journal of Environmental Science and Technology, 11(2), 509–516.
- Moron E. (2018) *Tratamiento anaerobio del suero lácteo en un reactor UASB piloto*. Steemit. [en línea] <https://steemit.com/stem-espanol/@emiliomoron/tratamiento-anaerobio-del-suero-lacteo-en-un-reactor-uasb-piloto>
- Nathanson J. & Ambulkar A. (2020) *WasteWater Treatment* Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/technology/wastewater-treatment>
- Nava L., Gasperín R., y Durán A. (2014). *Comparación de un reactor de biomasa suspendida y un reactor de biomasa adherida para la biodegradación de compuestos tóxicos presentes en aguas residuales de refinerías de petróleo*. Revista internacional de contaminación ambiental, 30(1), 101-112. de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992014000100009&lng=es&tlng=es.
- NORMA MEXICANA NMX-AA-026-SCFI-2010. *Análisis De Agua - Medición De Nitrógeno Total Kjeldahl En Aguas Naturales, Residuales Y Residuales Tratadas - Método De Prueba* -(Cancela A La NMX-AA-026-SCFI-2001).
- NORMA MEXICANA NMX-AA-028-SCFI-2001 *Análisis De Agua - Determinación De La Demanda Bioquímica De Oxígeno En Aguas Naturales, Residuales (DBO5) Y Residuales Tratadas - Método De Prueba*
- NORMA MEXICANA NMX-AA-030/1-SCFI-2012 *Análisis De Agua - Medición De La Demanda Química De Oxígeno En Aguas Naturales, Residuales Y Residuales Tratadas. - Método De Prueba - Parte 1 - Método De Reflujo Abierto*
- NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-002-SEMARNAT-1996, *Que Establece Los Límites Máximos Permisibles De Contaminantes En Las Descargas De Aguas Residuales A Los Sistemas De Alcantarillado Urbano O Municipal*.
- NORMAS OFICIALES MEXICANAS NOM-083-SEMARNAT-2003. *Especificaciones de Protección Ambiental Para la Selección del Sitio, Diseño, Construcción, Operación, Monitoreo, Clausura Y Obras Complementarias De Un Sitio De Disposición Final De Residuos Sólidos Urbanos Y De Manejo Especial*.
- Noyola A., Vega E., Ramos J. y C. Calderón (2000) *Alternativas De Tratamiento De Agua Residual*. Instituto Mexicano De Tecnología Del Agua, IMTA Primera Reimpresión. 60 pp
- Orbital Ingeniería (2013) *Micro-Filtración* <https://orbitalingenieria.com.ar/productos/micro-filtracion-tangencial-orbital-ingenieria/>
- Osmofilter (2018) Membranas Industrial. *¿Qué tiempo de vida tiene una membrana de ósmosis inversa?* https://www.osmofilter.com/mx/industrial_membranas.php
- Paul J. (2017) *An Introduction To Water And Wastewater Engineering*. Pe., R.A 2nd Edition 594 pp
- Picón P. (2015) Portal de Ingenieros Químicos. *EDAR Clarificadores* <https://ingenierosquimicos.wordpress.com/2015/08/02/edar-clarificadores/>
- PURITREC de México (2020) *Tratamiento de Agua* <https://www.manantialwater.com.mx/purificacion/desinfeccion-de-agua-con-luz-ultravioleta/>
- Remtavares (2006) El Agua. Madrid Blogs. *Reactores biológicos secuenciales (SBR): una tecnología versátil para el tratamiento de aguas residuales industriales*. <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2006/12/01/53336>
- Ripley E. (2013) *Settling Performance In Wastewater Fed High Rate Algae Ponds*. Environmental Science
- Rusell D, (2019). *Practical Wastewater Treatment*. Second Edition PE, Lilburn, Global Environmental Operations Inc.
- Shun D. (2007) *Water and Wastewater Calculations Manual*. Editor of Handbook of Environmental Engineering Calculations. Second Edition. 960 pp.
- SPENA GROUP (2020) *Tipos de Tratamiento de Aguas Residuales* <http://spenagroup.com/tipos-tratamiento-agua-aguas-residuales/#1561762217672-1567bfa2-456a>

- Srinivasa D. & Ting Y. (2017) Current Developments in Biotechnology and Bioengineering. *Anaerobic Treatment of Low-Strength Wastewater* <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/sequencing-batch-reactor>
- SUNASS (2015) Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento. *Diagnóstico De Las Plantas De Tratamiento De Aguas Residuales En El Ámbito De Operación De Las Entidades Prestadoras De Servicios De Saneamiento* PDF <https://www.sunass.gob.pe/doc/Publicaciones/ptar.pdf>
- TAERSA (2020) *Anaeróbico- Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)*. Tratamiento de Aguas, Efluentes y Reúso S. A. <https://www.taersa.com/tecnologias-procesos/tratamiento-de-efluentes/tratamiento-secundario-o-biologico/anaerobico-upflow-anaerobic-sludge-blanket-uasb/>
- TAERSA (2020) *Intercambio Iónico*. Tratamiento de Aguas, Efluentes y Reúso S. A. <https://www.taersa.com/tecnologias-procesos/tratamiento-y-potabilizacion-de-agua/intercambio-ionico/>
- TTS INTERCONTINENTAL S.A de C.V. (2020) *Tratamiento Primario*. <http://tssinternacional.com/tratamiento-primario/#toggle-id-2>
- Ucelo (2021) MBBR. Reactor Biológico de Lecho Móvil. <https://www.ucelo.com.br/es/productos-mbbr>
- WEHRLE (2020) *SBR Rector biológico secuencial* <https://www.wehrle-werk.de/es/umwelt/technolog%C3%ADa/sbr-%E2%80%93-reactor-biol%C3%B3gico-secuencial>