

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería

TESIS:

Evaluación y optimización de los procesos de una planta de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados; caso PTAR CETYS en Mexicali, B.C.

Para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería

Presenta:

Julio César Juárez Rodríguez

Directora de Tesis:

Dra. M. Socorro Romero Hernández

Co-Director de Tesis:

Dr. Fernando Amílcar Solís Domínguez

MEXICALI, B.C.

OCTUBRE DE 2017

## DEDICATORIA

A Dios, por darme la oportunidad de permanecer hasta ahora aquí y aprender de quienes me enseñaron.

A mi papá que está en el cielo; donde seguramente si estuviera aquí me daría un beso en la frente y me diría que está muy orgulloso de mí. Qué triste que no lo pueda hacer y yo no lo pueda recibir.

A mi mamá, por su amor, consejos, cariños y besos de niño que aún me da. Aún los necesito.

A mi esposa Leonor; por su amor e incansable paciencia, como cuando el día espera a que acabe la noche para salir y la noche espera a que se aleje el día para hacer lo mismo. Siempre he contado con su apoyo incondicional. Te dedico este documento Leo.

A mis hijos Julio, Claudia, Isaac y Efraín, porque siempre he contado con su amor, comprensión y obediencia; lo cual agradezco infinitamente porque siempre he tenido de ellos respeto; el cual nunca me han faltado, característica de hijos buenos y nobles. Los amo.

A mis hermanos y en particular a Efraín y Claudia que se nos adelantaron camino al cielo. Me hubiera gustado verlos en mi examen.

*Y la tierra estaba desordenada y vacía, y las tinieblas estaban sobre la faz del abismo, y el Espíritu de Dios se movía sobre la faz de las aguas. **Gen 1:2***

*Luego dijo Dios: Haya expansión en medio de las aguas, y separe las aguas de las aguas e hizo Dios la expansión y separó las aguas que estaban debajo de la expansión, de las aguas que estaban sobre la expansión y fue así. **Gen. 1: 6-7***

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darme salud y la fuerza para terminar esta etapa de mi vida.

A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), por su apoyo para la realización de mis estudios de maestría.

A mi directora y co-director de tesis, Dra. M. Socorro Romero Hernández y Dr. Fernando Amílcar Solís Domínguez respectivamente, por la aportación de sus conocimientos y experiencias que me hicieron comprender el maravilloso campo del tratamiento del agua. Mi formación en el área del tratamiento del agua ha sido enriquecida con sus enseñanzas y tengo la fortuna de pocos de contar con su amistad.

A la Ingeniera Química Luz Estela Salazar por su apoyo incondicional en el laboratorio durante los análisis que se realizaron durante esta investigación. Estela, tiene una calidad humana envidiable. Gracias.

A la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM), por las facilidades otorgadas para realizar esta investigación en la planta de tratamiento de aguas residuales del CETYS Universidad y para aplicar medidas de mejora.

A mis ex alumnos de la carrera de Ingeniería Civil: Fernanda Montes Valadez, Kevin Velducea Agramont, Pablo Orozco Aragón y la estudiante de Bio-Ingeniería Karen Marelli Barraza Fabián, por su valiosa colaboración y apoyo en la recopilación de datos de campo y laboratorio, parte importante de este trabajo.

Al M.I. Julio César Juárez Vázquez, quien me acompañó durante mis estudios de posgrado en las clases, exámenes y prácticas de laboratorio. Fue mi compañero de estudio y colega expositor de cursos impartidos durante la maestría. Es un placer infinito contar con el apoyo de ingenieros de esta calidad; en un camino donde se presentaban dificultades, siempre conté con su apoyo incondicional. Gracias Maestro.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes	3
1.2 Descripción general del sistema de tratamiento de la PTAR CETYS	7
1.2.1 Afluente	8
1.2.2 Desbaste grueso	8
1.2.3 Bombeo	8
1.2.4 Desarenador	8
1.2.5 Tamizado	8
1.2.6 Reactor biológico aerobio	9
1.2.7 Sedimentación	9
1.2.8 Desinfección	9
1.2.9 Bombeo	10
1.2.10 Filtración	10
1.2.11 Efluente	10
1.3 Planteamiento del problema y justificación de estudio	10
1.4 Hipótesis	11
1.5 Objetivo general	11
1.6 Objetivos específicos	11
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>12</b>
2.1 Sistemas de tratamiento biológico	16
2.1.1 Procesos biológicos aerobios	17
2.1.1.1 Cultivos en suspensión	17
2.1.1.2 Cultivos fijos	17
2.2 Tratamiento de lodos activados	17

2.2.1 Lodos activados: proceso básico	17
2.2.2 Lodos activados: modificaciones del proceso básico	18
2.2.2.1 Aireación prolongada	18
2.2.2.2 Contacto estabilización	18
2.2.2.3 Tratamiento de lodos activados de aireación extendida	19
2.2.2.4 Procesos aerobios con biomasa soportada	20
2.2.2.5 Filtros percoladores	20
2.2.2.6 Contactores biológicos rotatorios (CBR): Biodiscos	22
2.2.2.6.1 Descripción de la tecnología	24
2.3 Procesos biológicos anaerobios	25
2.3.1. Formación de ácidos	26
2.3.2 Metanogénesis	26
2.3.3 Condiciones de operación	28
2.3.4 Reactores utilizados	29
2.3.4.1 Reactor de contacto (mezcla completa con recirculación de biomasa)	29
2.3.4.2 Reactor de manto de lodos y flujo ascendente	30
2.3.4.3 Filtro anaerobio (FA)	31
2.3.4.4 Reactor anaerobio de lecho Fluidizado (RALF)	32
2.3.4.5 Otros tipos de reactores	33
2.3.4.5.1 Fases del proceso en un reactor discontinuo secuencial	35
2.4 Microbiología del proceso de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados	36
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA</b>	<b>38</b>
3.1 Revisión bibliográfica	38
3.2 Caracterización del agua residual	38
3.3 Muestreo	38

3.4 Mediciones en campo	38
3.5 Análisis de laboratorio	39
3.6 Evaluación de las unidades de proceso de la PTAR CETYS	40
3.7 Comparación de parámetros operacionales encontrados en la evaluación y los indicados en el diseño de la PTAR CETYS	40
3.8 Análisis e interpretación de datos	41
3.9 Resultado del estudio y conclusiones	42
<b>CAPÍTULO 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL</b>	<b>43</b>
4.1 Desbaste grueso	43
4.2 Bombeo de agua residual	43
4.3 Desarenador	44
4.4 Tamizado	44
4.5 Reactor biológico aerobio	44
4.6 Sedimentación	46
4.7 Desinfección	47
4.8 Filtración	47
4.9 Efluente	47
4.10 Histórico de datos operativos PTAR CETYS	47
4.11 Aplicación de mejoras	48
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS</b>	<b>49</b>
5.1 Desbaste grueso	49
5.1.1 Separación de barras	49
5.1.2 Pérdida de carga	50
5.2 Bombeo de agua residual	52

5.2.1 Carga dinámica total (CDT) y gasto hidráulico (caudal)	53
5.3 Desarenador	57
5.4 Tamizado	59
5.5 Reactor biológico aerobio	62
5.5.1 Parámetros medidos en el reactor: pH, temperatura, OD y TRH	62
5.5.2 El TMRC y la relación A/M en el reactor biológico de la PTAR CETYS	67
5.5.3 Carga orgánica	68
5.6 Sedimentador	73
5.6.1 TRH y carga superficial.	73
5.7 Desinfección	74
5.7.1 Tiempo de contacto	75
5.7.2 Dosis de cloro	76
5.8 Filtración	76
5.8.1 Tasa de filtración	77
5.9 Efluente	77
5.9.1 DBO <sub>5</sub> , coliformes fecales, cloro residual y SST	77
5.10 Información histórica de operación de PTAR CETYS	80
5.11 Aplicación de mejoras	83
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>86</b>
6.1 Conclusiones	86
6.2 Recomendaciones	91
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>94</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de reactores para el tratamiento de aguas residuales	2
Figura 2. Procesos de lodos activados	2
Figura 3. Vista de la PTAR CETYS	6
Figura 4. Ubicación de áreas verdes de CETYS Universidad	6
Figura 5. Esquema del tren de tratamiento de la PTAR CETYS	7
Figura 6. Proceso biológico de contacto-estabilización	19
Figura 7. Composición típica de un filtro percolador	21
Figura 8. Diagrama de operación típico de un filtro percolador	21
Figura 9. Esquema de biodisco	24
Figura 10. Esquema de la ruta de degradación anaerobia	27
Figura 11. Reactor anaerobio de contacto	29
Figura 12. Reactor UASB	30
Figura 13. Corte en reactor UASB	31
Figura 14. Filtro anaerobio de flujo ascendente	32
Figura 15. Filtro anaerobio de lecho fluidizado	33
Figura 16. Fases del proceso de un reactor discontinuo secuencial	35
Figura 17. Seguimiento de evaluación de procesos de PTAR CETYS	41
Figura 18. Ubicación de rejilla en cárcamo de bombeo de agua residual en PTAR CETYS	49
Figura 19. Pérdida de carga en desbaste grueso en la PTAR CETYS	50
Figura 20. CDT en bombeo de agua cruda en la PTAR CETYS	56
Figura 21. Vista de desarenador tipo vórtice de la PTAR CETYS	57
Figura 22. TRH en desarenador tipo vórtice en la PTAR CETYS	58
Figura 23. Vista del tamiz de la PTAR CETYS	58
Figura 24. Esquema de funcionamiento de tamiz estático	59
Figura 25. Reactor biológico aerobio de la PTAR CETYS	61

Figura 26. SSV en función de del caudal de la PTAR CETYS	68
Figura 27. La relación A/M en función del caudal de la PTAR CETYS	68
Figura 28. Porcentaje de recirculación de lodos en función del caudal de la PTAR CETYS	70
Figura 29. Promedios mensuales de OD en el reactor de la PTAR CETYS	70
Figura 30. Los SSV en recirculación de lodos de abril a noviembre de 2015 en la PTAR CETYS	71
Figura 31. TRH en el reactor biológico aerobio de la PTAR CETYS	71
Figura 32. Sedimentador en la PTAR CETYS	72
Figura 33. Cámara de contacto de cloro de la PTAR CETYS	74
Figura 34. Filtros de la PTAR CETYS	75

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de operación típicos en procesos de fangos activados	3
Tabla 2. Plantas de tratamiento de aguas residuales en operación en Baja California	5
Tabla 3. Información general de la PTAR CETYS	7
Tabla 4. Normatividad en materia de agua residual y reúso en México	13
Tabla 5. Características físicas, químicas y biológicas del agua residual y sus procedencias	15
Tabla 6. Condiciones de operación para distintos reactores anaerobios	34
Tabla 7. Parámetros medidos en campo	38
Tabla 8. Parámetro, técnica y método en análisis de aguas residuales en laboratorio	39
Tabla 9. Límites máximos permisibles en la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997	39
Tabla 10. Parámetros a evaluar por proceso unitario	40
Tabla 11. Caracterización del agua cruda residual en diseño de PTAR CETYS	41
Tabla 12. Pérdida de carga en rejilla de la PTAR CETYS	49
Tabla 13. Datos de tubería de agua residual del afluente de la PTAR CETYS	51
Tabla 14. Registro de caudales de ingreso de agua residual a PTAR CETYS	52
Tabla 15. Pérdida de carga en descarga de bomba sumergible de la PTAR CETYS	53
Tabla 16. Pérdida de carga en línea de impulsión de la PTAR CETYS	54
Tabla 17. CDT a caudal de diseño de la PTAR CETYS	55
Tabla 18. CDT a diferentes caudales de operación de la PTAR CETYS	55
Tabla 19. Tiempo de retención en desarenador a diferentes caudales de operación de la PTAR CETYS	57
Tabla 20. Resultados de DBO <sub>5</sub> en tamiz de la PTAR CETYS	59
Tabla 21. Resultados de SST en tamiz de la PTAR CETYS	60
Tabla 22. Resultados de SSV en tamiz en la PTAR CETYS	60
Tabla 23. Parámetros medidos en reactor de la PTAR CETYS en junio de 2015	62

Tabla 24. Parámetros medidos en reactor durante el mes de julio de 2015	62
Tabla 25 Parámetros medidos en reactor durante el mes de agosto de 2015	63
Tabla 26. Parámetros medidos en reactor durante el mes septiembre de 2015	64
Tabla 27. Parámetros medidos en reactor durante el mes de octubre de 2015	65
Tabla 28. Parámetros medidos en reactor durante el mes de noviembre de 2015	65
Tabla 29. Resultados de DBO <sub>5</sub> , SSV y caudales para determinación de TMRC y relación A/M	66
Tabla 30. Resultados de TMRC, relación A/M, DBO <sub>5</sub> y rendimiento del proceso de la PTAR CETYS	67
Tabla 31. Resultados de carga superficial y TRH en sedimentador la PTAR CETYS	73
Tabla 32. Tiempo de contacto de cloro en la cámara de desinfección de la PTAR CETYS	74
Tabla 33. Dosis de cloro aplicada en PTAR CETYS en 2015	75
Tabla 34. Tasa de filtración a diferentes caudales de operación de la PTAR CETYS	76
Tabla 35. Resultados de DBO <sub>5</sub> y coliformes fecales en efluente de PTAR CETYS	77
Tabla 36. Resultados de cloro residual en efluente de PTAR CETYS	78
Tabla 37. Resultados de SST en efluente de PTAR CETYS	79
Tabla 38. Volumen de agua residual cruda tratada en el 2015 en PTAR CETYS	80
Tabla 39. Resultados de DBO <sub>5</sub> , SST y coliformes fecales en efluente PTAR CETYS en 2016	81
Tabla 40. Resultados de DBO <sub>5</sub> , SST y coliformes fecales en efluente PTAR CETYS en 2017	82
Tabla 41. Costo de agua residual tratada vertida a demasías	84
Tabla 42. Resultados de DBO <sub>5</sub> , SST y coliformes fecales en 2015, 2016 y 2017 en efluente de PTAR CETYS y los límites de la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997	85
Tabla 43. Promedio anual 2015 de parámetros operativos comparados con los valores de diseño de PTAR CETYS	86

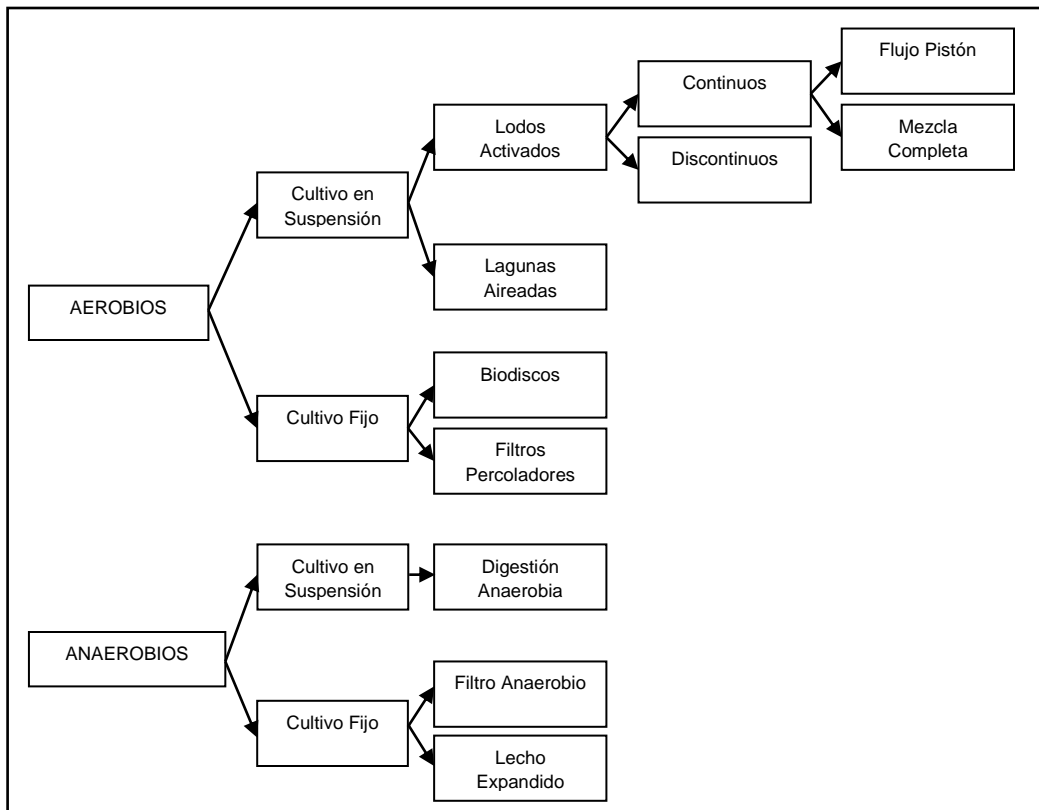
## **RESUMEN**

El presente estudio tuvo como propósito evaluar el funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales del Centro de Enseñanza Técnica y Superior (PTAR CETYS) en Mexicali, B.C., operada por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM). Además se aplicaron medidas para mejorar la calidad en el efluente que es enviado a las instalaciones de CETYS Universidad, donde se reúsa para el riego de áreas verdes. Para ello fue necesario evaluar todos los procesos unitarios que componen la planta y para la caracterización del agua en cada proceso se tomaron muestras para la realización de análisis físicos, químicos y bacteriológicos de acuerdo a la normatividad vigente. Una vez obtenidos los datos de campo y laboratorio se compararon los valores de parámetros calculados con los valores utilizados en el diseño y se determinaron los parámetros óptimos de operación de la planta. Con base en los resultados obtenidos del estudio, se propusieron acciones de mejora y algunas de ellas se aplicaron, logrando resultados favorables en el funcionamiento de la planta.

# CAPÍTULO 1

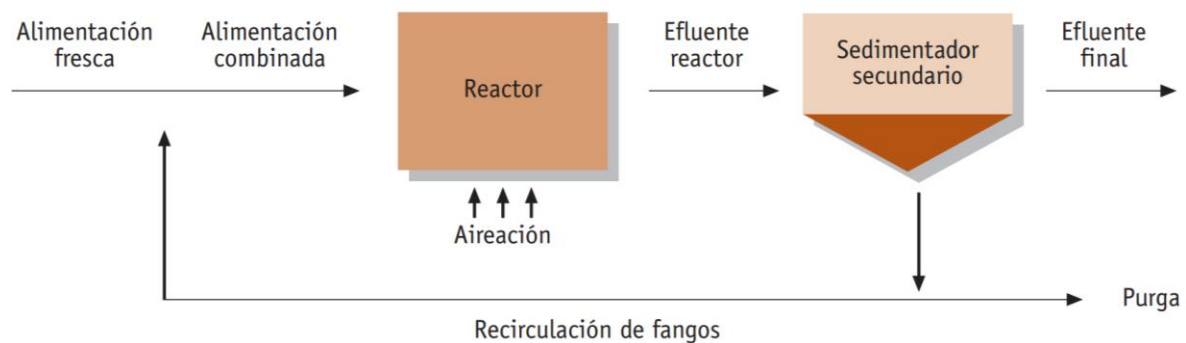
## INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales, es un proceso que incorpora transformaciones físicas, químicas y biológicas, con el objeto de tratar y remover los contaminantes del agua. El objetivo del tratamiento es producir agua ya limpia o reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o fango que puede utilizarse para diversos y diferentes propósitos. Las aguas residuales están constituidas fundamentalmente por las aguas de abastecimiento después de haber pasado por las diversas actividades o usos por parte de la población y son generadas por residencias, instituciones y locales comerciales e industriales. Estas aguas pueden ser tratadas dentro del sitio en el cual es generado o recogido y llevado mediante una red de tuberías y eventualmente bombas a una planta de tratamiento local. Los esfuerzos para coleccionar y tratar las aguas residuales de las descargas están típicamente sujetos a regulaciones y estándares locales, estatales y federales (regulaciones, controles, normatividades). Si estas aguas no se manejan adecuadamente, generan impactos ambientales adversos y diversos en el medio, por lo cual es muy importante cumplir con las exigencias de la normatividad. Es por ello que son necesarias las plantas de tratamiento para mejorar la calidad de vida de la población además de poder darle una reutilización al agua para actividades básicas del ser humano. En México cerca del 80 % de las aguas residuales municipales e industriales, se vierten a los cuerpos de agua sin recibir tratamiento alguno. Actualmente se están viviendo graves problemas con la distribución del agua y su mal aprovechamiento en las ciudades de nuestro país [1]. En la Figura 1 se muestra la clasificación de los tipos de tratamiento de aguas residuales.



**Figura 1. Tipos de reactores para el tratamiento de aguas residuales [2]**

Para este proyecto el sistema en estudio es el tratamiento biológico integrado por lodos activados de aireación extendida mostrado en la Figura 2 y cuyos parámetros de diseño: Relación alimento microorganismo (A/M), tiempo de retención hidráulico (TRH), tiempo medio de retención celular (TMRC), sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado (SSVLM), carga orgánica y recirculación de lodos se indican en la Tabla 1.



**Figura 2. Proceso de lodos activados [3]**

**Tabla 1. Parámetros de operación típicos en procesos de fangos activados [3]**

<b>Parámetro</b>	<b>Convencional</b>	<b>Aireación prolongada</b>	<b>Contacto estabilización</b>
A/M [kg DBO <sub>5</sub> /kg SSV.d]	0.20 – 0.40	0.05 – 0.15	0.20 – 0.60
TRH [h]	4 – 8	18 - 36	3 - 6
TMRC [d]	5 – 15	20 - 30	5 - 15
SSVLM [mg/L]	1,500 – 3,000	1,500 – 5,000	4,000 – 9,000
Carga orgánica [kgDBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup> d]	0.30 – 0.60	0.10 – 0.40	1.00 – 1.20
Recirculación r [%]	25 - 50	50 - 150	50 - 150

### **1.1 Antecedentes**

“En el pasado; las aguas residuales no eran importantes para ser reutilizadas. Frente a la creciente escasez de agua limpia, este humilde y abundante recurso empieza a ser revalorado” [4].

En México, se tienen problemas de disponibilidad de agua por su distribución fisiográfica y climática, contaminación de aguas superficiales y subterráneas y por el incremento acelerado de las demandas que requieren los diferentes usos. El reúso del agua en la agricultura es una práctica conocida en el país; sin embargo, el reúso en la industria, servicios municipales, usos secundarios y recarga de acuíferos entre otros, sólo se practica en una proporción reducida. Ante la inminente escasez del recurso en algunas zonas del país, el reúso del agua se plantea como una alternativa de abastecimiento. El reúso actual y potencial se presenta principalmente en la industria (agua para enfriamiento y agua para calderas), en la agricultura, los fraccionamientos que contemplan dentro de sus instalaciones grandes áreas verdes y campos de golf, lagos recreativos y en menor proporción en el lavado de carros, instituciones educativas, en el municipio (riego de camellones, parques y lagos), entre otros [5].

En los países industrializados se han manifestado de una manera más temprana los problemas de escasez del agua, de su contaminación y de los impactos ambientales generados por su uso inadecuado, razones por las cuales se han generado y desarrollado programas para su conservación, control y uso más eficiente [5].

El reúso planeado de las aguas residuales en Estados Unidos empezó a principios de los años 20 en la agricultura en los estados de Arizona y California. En Colorado y Florida se desarrollaron sistemas para el reúso urbano. La normatividad para el reúso también inició en California en la misma época. A partir de 1965, esta normatividad impulsa de manera decisiva el reciclamiento y el reúso de las aguas residuales. Se puede decir que en la actualidad de manera general ya son muchos los países en donde se practican diferentes tipos de reúso y que existen muchos estudios que justifican y apoyan esta práctica [6]. Ejemplos son los realizados en Israel, España en la región de Cataluña, en Japón con los sistemas descentralizados, en Australia entre otros países [5].

La ciudad de Mexicali es la capital del estado de Baja California. Se ubica en la frontera norte del país; y cuenta con 988,417 habitantes (INEGI 2015) [6]. Al fundarse en el año de 1903, nace como el centro de la región algodonera más grande del mundo, para luego adquirir una marcada vocación industrial. En la actualidad se le conoce como “La ciudad que atrapó el sol”, debido a su característico clima extremo que en verano alcanza los 50 °C a la sombra [7].

Para atender la creciente demanda de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento, el 18 de diciembre de 1967 se publica en el Periódico Oficial del Gobierno del Estado, el decreto No. 99 de la V Legislatura, mediante el cual se crea la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM) [8], como un organismo público descentralizado, con personalidad jurídica y patrimonio propio la cual opera en la actualidad la PTAR CETYS [8].

Actualmente en el estado de Baja California se cuentan con 31 plantas de tratamiento de aguas residuales [9] mostradas en la Tabla 2.

**Tabla 2. Plantas de tratamiento de aguas residuales en operación en Baja California [9]**

MUNICIPIO	LOCALIDAD	NOMBRE DE LA PLANTA	PROCESOS	CAPACIDAD INSTALADA (l/s)	CAUDAL TRATADO (l/s)	CUERPO RECEPTOR O REÚSO
ENSENADA	ENSENADA	EL GALLO	LODOS ACTIVADOS	200	137	ARROYO EL GALLO
ENSENADA	ENSENADA	EL NARANJO	ZANJAS DE OXIDACIÓN	500	380	ARROYO EL GALLO / OCEÁNO PACÍFICO
ENSENADA	ENSENADA	EL SAUZAL	ZANJAS DE OXIDACIÓN	120	62.7	OCEÁNO PACÍFICO
ENSENADA	ENSENADA	NORESTE	LODOS ACTIVADOS	26	28.1	ARROYO DOÑA PETRA
ENSENADA	RODOLFO SANCHEZ T. (MANEADERO)	HOGARES DEL PUERTO	LODOS ACTIVADOS	8	2	RIEGO AGRÍCOLA
MEXICALI	CIUDAD MORELOS (CUERVOS)	CIUDAD MORELOS	LAGUNAS AIREADAS	30	14.1	CANAL EL ÁLAMO
MEXICALI	ESTACIÓN COAHUILA (KM 57)	ESTACIÓN COAHUILA	LAGUNAS AIREADAS	20	9.2	DREN AGRÍCOLA
MEXICALI	GUADALUPE VICTORIA (KM 43)	GUADALUPE VICTORIA	LAGUNAS AIREADAS	70	26.3	DREN AGRÍCOLA
MEXICALI	MEXICALI	CETYS	LODOS ACTIVADOS	7	3.6	REÚSO
MEXICALI	MEXICALI	LAS ARENITAS	LAGUNAS AIREADAS	840	780.4	DREN AGRÍCOLA CUCAPAH
MEXICALI	MEXICALI	TERMOELÉCTRICA AZTECA (LA ROSITA)	LODOS ACTIVADOS	640	223.9	DREN AGRÍCOLA
MEXICALI	MEXICALI	UABC	LODOS ACTIVADOS	10	7.5	REÚSO
MEXICALI	MEXICALI	ZARAGOZA	LAGUNAS AIREADAS	1300	930.4	RÍO NUEVO
MEXICALI	SAN FELIPE	SAN FELIPE	LAGUNAS AIREADAS	120	66.7	INFILTRACIÓN Y RIEGO
MEXICALI	VICENTE GUERRERO (ALGODONES)	LOS ALGODONES	LAGUNAS AIREADAS	20	6.5	DREN AGRÍCOLA CULIACÁN
PLAYAS DE ROSARITO	PLAYAS DE ROSARITO	ROSARITO I	LAGUNAS AIREADAS	60	64.1	OCEÁNO PACÍFICO
PLAYAS DE ROSARITO	PLAYAS DE ROSARITO	PUERTO NUEVO	LODOS ACTIVADOS	2.6	1.8	OCEÁNO PACÍFICO
PLAYAS DE ROSARITO	PLAYAS DE ROSARITO	ROSARITO NORTE	ZANJAS DE OXIDACIÓN	210	84.9	OCEÁNO PACÍFICO
PLAYAS DE ROSARITO	PUERTO NUEVO	VISTA MARINA	ZANJAS DE OXIDACIÓN	6	1.2	OCEÁNO PACÍFICO
TECATE	TECATE	CERESO EL HONGO	LODOS ACTIVADOS	27.5	9.6	ARROYO LAS CALABAZAS
TECATE	TECATE	TECATE	FILTROS PERCOLADORES	200	135.9	ARROYO TECATE
TIJUANA	SAN ANTONIO DEL MAR	SAN ANTONIO DEL MAR	LODOS ACTIVADOS	2.5	3.5	OCEÁNO PACÍFICO
TIJUANA	TERRAZAS DEL VALLE	VISTA DEL VALLE	LODOS ACTIVADOS	9	3.5	COLECTOR DE AGUAS RESIDUALES
TIJUANA	TIJUANA	ARTURO HERRERA	LODOS ACTIVADOS	460	202.5	RÍO TIJUANA
TIJUANA	TIJUANA	BINACIONAL O PITAR	PRIMARIO AVANZADO	1100	1322	OCEÁNO PACÍFICO
TIJUANA	TIJUANA	ECOPARQUE	FILTROS PERCOLADORES	5	2.6	RIEGO ÁREAS VERDES
TIJUANA	TIJUANA	EL PRADO	LODOS ACTIVADOS	56	25.2	ARROYO HUAGUATAY
TIJUANA	TIJUANA	EL REFUGIO	LODOS ACTIVADOS	50	30.3	RÍO TIJUANA
TIJUANA	TIJUANA	PORTICOS DE SAN ANTONIO	LODOS ACTIVADOS	15	7.5	ARROYO SIN NOMBRE
TIJUANA	TIJUANA	SAN ANTONIO DE LOS BUENOS	LAGUNAS AIREADAS	1100	1041.7	OCEÁNO PACÍFICO
TIJUANA	TIJUANA	SANTE FE	LODOS ACTIVADOS	19	5.3	REÚSO ÁREAS VERDES

En Mexicali, se han instalado varias plantas de tratamiento de agua residual de lodos activados en instituciones educativas de nivel superior como lo son la Universidad Autónoma de Baja California, Instituto Tecnológico de Mexicali y CETYS Universidad. Estas instituciones están comprometidas con el medio ambiente, por lo que tienen el reto de tratar el agua residual que generan, no sólo para cumplir con las normas para descarga sino para su utilización en el riego de sus áreas verdes [10].

La PTAR CETYS inició sus operaciones en septiembre del 2008 [11]. Esta planta consiste en un sistema de lodos activados de aireación extendida. En la Figura 3 se muestra una imagen de dicha planta.



**Figura 3. Vista de la PTAR CETYS**

En la Figura 4 se muestra una vista aérea del campus CETYS Universidad en donde se pueden apreciar las áreas verdes.



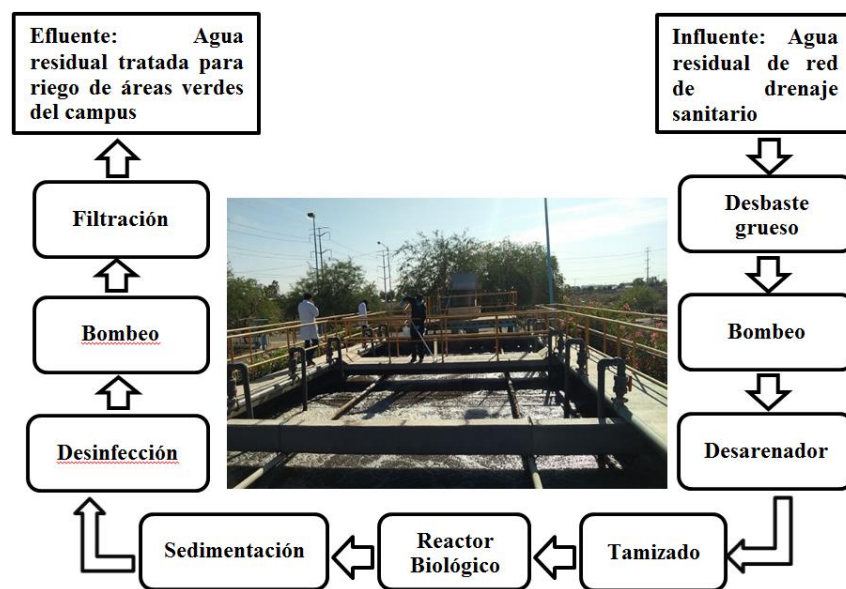
**Figura 4. Ubicación de áreas verdes de CETYS Universidad**

En la Tabla 3 se presenta la información general de la PTAR CETYS.

**Tabla 3. Información general de la PTAR CETYS [8]**

Información General	
Año de inicio de operación	Agosto de 2008
Capacidad actual	7 L/s
Destino del agua residual tratada	Área verdes campus CETYS
Fuente de abastecimiento de A.R.	Drenaje municipal
Superficie total del predio	1,452.45 m <sup>2</sup>
Tipo de tratamiento	Lodos activados de aireación extendida
Coordenadas	32°39'31.93"N 115°24'13.46"O

En la Figura 5 se presenta un esquema del tren de tratamiento que constituye la PTAR-CETYS la cual utiliza la tecnología de tratamiento biológico de lodos activados [11].



**Figura 5. Esquema del tren de tratamiento de la PTAR CETYS**

## 1.2 Descripción general del sistema de tratamiento de la PTAR CETYS

El proceso de tratamiento de lodos activados seleccionado fue la modalidad de Aireación Extendida, por su flexibilidad de operación y su facilidad en absorber choques de altas cargas orgánicas. Los componentes principales son:

### **1.2.1 Afluente**

El agua negra cruda llega a la planta de tratamiento por una línea de 8" de diámetro de cloruro de polivinilo (PVC), procedente de un pozo de visita ubicado en la calle Bernardo Reyes de la colonia Corregidora, correspondiente a un colector de 30" de diámetro de PVC de la red de alcantarillado sanitario de la ciudad de Mexicali.

### **1.2.2 Desbaste grueso**

Formada por una rejilla de desbaste gruesa en forma de canastilla con el objeto de retener basuras y sólidos grandes de 3/4" de diámetro como máximo. Este material es retirado a través de un mecanismo de elevación (malacate), que permite subir y bajar la canastilla a la parte superior del cárcamo para remover los residuos sólidos y darles disposición.

### **1.2.3 Bombeo**

La impulsión del agua residual se realiza con 2 bombas sumergibles en un sistema 1+1 de 7 L/s cada una, que conduce el agua hacia el desarenador.

### **1.2.4 Desarenador**

El sistema de separación de arenas y sólidos finos se realiza con un desarenador marca West Tech tipo Vortex, de 48" de diámetro. El agua residual ingresa a esta unidad de forma tangencial, lo que provoca que las arenas se adhieran a las paredes y por gravedad éstas bajen hasta el fondo en forma de un cono donde la sección se reduce hasta 6" de diámetro.

### **1.2.5 Tamizado**

Está formado por un tamiz estático que tiene por objeto la reducción del contenido en sólidos en suspensión de las aguas residuales [12], mediante su filtración a través de un soporte delgado dotado de ranuras de paso. El agua a tratar se alimenta por la parte superior del tamiz, los sólidos del tamaño superior a la luz de paso quedan retenidos por el enrejado y, debido a la inclinación de éste, ruedan hasta un contenedor situado en la parte inferior.

Por su parte la fracción líquida, conteniendo los sólidos de tamaño inferior al tamaño de paso, atraviesa el enrejado y se recoge en una tubería situada en la parte interior del tamiz [12]. La abertura entre rejillas es de 1.5 mm y el ancho de la reja es de 48". Una eficiencia en la operación de esta unidad se alcanza cuando por lo menos se logra remover el 5 % de los SST que ingresan a la unidad.

### **1.2.6 Reactor biológico aerobio**

Siendo la estructura principal de todo el proceso, cuenta con una dimensión de 7 m x 15.07 m x 4.60 m con un volumen de 485.25 m<sup>3</sup>. Construido con concreto armado con resistencia a la compresión de  $F'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ . La estructura de entrada es un canal rectangular con 12 perforaciones de 3" de diámetro equidistantes a todo lo ancho del reactor. Los sopladores conducen el aire al fondo del reactor por medio de 14 líneas de 3" de diámetro colocadas siete al lado norte y siete a los lados sur y controladas cada una de ellas por una válvula de bola de 3" de diámetro instalada en la parte superior. En la plantilla existen siete difusores circulares de 12" de diámetro marca SSI AFD 350 de burbuja fina de 10,155 perforaciones, dichos difusores están sobre el lomo de cada una de las líneas de tuberías. Considerando 14 líneas de distribución, existen en total 98 difusores de aire dentro del tanque de aireación [8].

### **1.2.7 Sedimentador**

La geometría del sedimentador está diseñada de manera que provea un tiempo de residencia de 4.4 h con una carga superficial de 16.71 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>-d a una velocidad de sedimentación de 1.045 m/h ( $F_s = 1.5$ ). Cuenta con dos fondos cónicos para el depósito de los lodos [9].

### **1.2.8 Desinfección**

La desinfección del agua se efectúa mediante la dosificación de cloro en solución a partir de hipoclorito de sodio al 13 %, a un tanque donde se le aplica el desinfectante para disminuir el contenido de bacterias coliformes fecales a un valor permisible por la norma NOM-003-SEMARNAT-1997 [13] que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público y que corresponde a 1,000 NMP/100 mL.

### **1.2.9 Bombeo**

Se utilizan 2 bombas centrifugas horizontales de 5 HP para impulsar el agua desde la cámara de contacto de cloro hasta el punto de entrega que es un tanque de regulación y que se ubica dentro de las instalaciones de CETYS Universidad.

### **1.2.10 Filtración**

El sistema de filtración, lo componen 2 filtros de acero de 3/8" de espesor y 42" de diámetro por 75" de alto. Las líneas internas son de tubería ranuradas de 2½" de espesor en PVC. Los filtros se diseñaron para operar a 5.7 GPM/ft<sup>2</sup> como tasa de filtración.

### **1.2.11 Efluente**

Una vez que el agua residual tratada pasa por los filtros, el punto final de entrega es una cisterna de almacenamiento que se encuentra dentro del centro educativo CETYS Universidad y a 652 m de distancia de la PTAR CETYS operada por CESP. Esta agua debe cumplir con los parámetros indicados en la Tabla 1.

## **1.3 Planteamiento del problema y justificación del estudio**

Se realizaron varias visitas de reconocimiento a la PTAR CETYS y se observaron problemas en el funcionamiento de algunos procesos unitarios, fallas estructurales y falta de mantenimiento. También se observó que la planta no tiene la atención continua requerida, pues cuenta con personal de operación sólo para un turno de ocho horas de trabajo.

De la revisión general de la planta se identificaron áreas de oportunidad para hacer más eficiente el tratamiento del agua residual y para mejorar la calidad del agua en el efluente.

## **1.4 Hipótesis**

La PTAR CETYS está operando de forma deficiente, lo cual genera incumplimiento en algunos parámetros de la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 [13] aplicable al reúso de aguas tratadas en sector público.

## **1.5 Objetivo General**

Evaluar el funcionamiento de la PTAR CETYS, y elaborar propuestas para mejorar la eficiencia de operación.

## **1.6 Objetivos Específicos**

1. Evaluar la eficiencia de operación de cada proceso unitario de la PTAR CETYS.
2. Determinar los parámetros óptimos de operación y hacer los ajustes factibles para hacer más eficiente la PTAR CETYS.
3. Implantar mejores prácticas operativas de la PTAR CETYS.
4. Hacer un comparativo de la calidad del efluente con los límites máximos permisibles de la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 [13] referente a la DBO, SST y coliformes fecales.

## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO

Ha sido notable en los últimos años, la evolución de actividades de recuperación de aguas residuales, en diferentes partes del mundo, convirtiéndose en una nueva alternativa, especialmente en zonas áridas y semiáridas [14]. Actualmente más de 20 millones de hectáreas en cincuenta países, se riegan con aguas negras; existe, además, más de 2,000 plantas de tratamiento de aguas para el reúso, sin embargo, todavía sólo son un 5 % del total de las aguas residuales tratadas y un 0.18 % de la demanda de agua mundial [15]. Esta difusión de actividades de reúso de aguas residuales fue acompañada por una transformación en los marcos legales de cada Estado, incorporando y adaptando la actividad a las normativas sobre la gestión del agua y los criterios que limitan su utilización en cuanto a los aspectos que aseguren el cumplimiento de condiciones sanitarias y ambientales que minimicen los riesgos de su utilización. Por lo tanto, como actividad aún de carácter incipiente presenta a nivel internacional, una fuerte dinámica de generación de nuevos conocimientos en sistemas de tratamiento, gestión y planificación integrada de cuenca [16], monitoreo de calidad de los recursos hídricos y definición de estándares en función del uso final, entre otros.

La necesidad de profundizar mecanismos que incentiven un uso más sustentable de los recursos hídricos, sigue impulsando la incorporación de tecnologías que respeten el ciclo del agua, dando como resultado el crecimiento de actividades de regeneración de agua residual en diferentes países y el desarrollo de diversas tecnologías para su tratamiento [17]. Entre los antecedentes más relevantes se encuentran las experiencias de China con una capacidad de reúso de más de 20,2 millones de metros cúbicos por día que representan el 9.2 % de los efluentes y el 13.1 % de los efluentes tratados [18] y México con una generación de aguas residuales tratadas de 4,722 millones de metros cúbicos por año según lo informa el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en el año 2009 [14]. El tratamiento del efluente cloacal destinado al reúso en actividades productivas, evitaría los aportes de contaminantes actuales a los cuerpos receptores debido al generalizado déficit o ausencia de los mismos, previo a su disposición final; pues el uso de aguas residuales en el mundo se realiza

mayoritariamente con aguas residuales sin tratamiento previo, destinadas en un porcentaje mayoritario a las actividades agrícolas. Especialmente, en Latinoamérica existe un gran atraso en el desarrollo de instalaciones de tratamiento de los efluentes urbanos.

En México, existen regulaciones (mostradas en la Tabla 4) que norman la calidad del agua residual vertida a diferentes descargas o disposiciones finales. Los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales, que tienen como destino final el reúso en riego de áreas verdes, deben cumplir con límites máximos establecidos la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 [13]. Los límites máximos permisibles de esta normatividad deben cumplirse; porque esta agua eventualmente estará en contacto con el ser humano, debido a las actividades recreativas que se desarrollan en dichas áreas.

**Tabla 4. Normatividad en materia de agua residual y reúso en México**

Clave	Título
NOM-001-SEMARNAT-1996 [19]	Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales y bienes nacionales.
NOM-002-SEMARNAT-1996 [20]	Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
NOM-003-SEMARNAT-1997 [13]	Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.
NOM-004-SEMARNAT-2002 [21]	Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final.
NOM-014-CONAGUA-2003 [22]	Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.
NOM-015-CONAGUA-2007 [23]	Características y especificaciones de las obras y del agua para infiltración artificial a acuíferos.

“Se denomina aguas servidas a aquellas que resultan del uso doméstico o industrial del agua. Se les llama también aguas residuales, aguas negras o aguas cloacales. Son residuales pues, habiendo sido usada el agua, constituyen un residuo, algo que no sirve para el usuario directo; son negras por el color que habitualmente tienen. Algunos autores hacen una diferencia entre aguas servidas y aguas residuales en el sentido que las primeras solo provendrían del uso doméstico y las segundas corresponderían a la mezcla de aguas domésticas e industriales [24]”.

“El conocimiento de la naturaleza del agua residual es fundamental de cara al proyecto y explotación de las infraestructuras tanto de recolección como de tratamiento y evacuación de las aguas residuales, así como para la gestión de la calidad medioambiental. El análisis y la elección de los procesos de tratamiento es uno de los aspectos más importantes del diseño de las plantas de tratamiento” [9], ya que “Cada planta es única, así que para estabilizarla y hacerla funcionar correctamente se necesita conocer”, la caracterización del afluente, para así poder hacer ajustes en el sistema de tratamiento seleccionado [25].

“El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen como fin eliminar los contaminantes en el efluente del uso humano. El objetivo del tratamiento es producir agua limpia (o efluente tratado) o reutilizable en el ambiente y un residuo sólido o fango (también llamado biosólido o lodo) convenientes para su disposición o reúso. Es muy común llamarlo depuración de aguas residuales para distinguirlo del tratamiento de aguas potables [26].”

“Existen diversos métodos de tratamiento o depuración que permiten disminuir notablemente la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) o la demanda química de oxígeno (DQO) final del efluente” [27]. En la Tabla 5 se presentan las características físicas, químicas y biológicas del agua residual y sus procedencias. Las cuales son indispensables para el proceso de la planta [10].

“En el tratamiento de aguas residuales se pueden distinguir cuatro etapas que comprenden procesos químicos, físicos y biológicos.

- a) Tratamiento preliminar, destinado a la eliminación de residuos fácilmente separables y en algunos casos un proceso de pre-aireación.
- b) Tratamiento primario, que comprende procesos de sedimentación y tamizado.
- c) Tratamiento secundario que comprende procesos biológicos aerobios y anaerobios y físico-químicos (floculación) para reducir la mayor parte de la DBO.
- d) Tratamiento terciario o avanzado que está dirigido a la reducción final de la DBO, metales pesados y/o contaminantes químicos específicos y la eliminación de patógenos y parásitos” [28].

**Tabla 5. Características físicas, químicas y biológicas del agua residual y sus procedencias [29] modificado por [10]**

<b>Características</b>	<b>Procedencia</b>
<b>Propiedades físicas:</b>	
Color	Aguas residuales domésticas e industriales, de degradación natural de materia orgánica.
Olor	Agua residual de descomposición, residuos industriales.
Sólidos	Agua de suministro, aguas residuales domésticas e industriales, erosión del suelo, infiltración y conexiones incontroladas.
Temperatura	Aguas residuales domésticas e industriales.
<b>Constituyentes químicos:</b>	
<b>Constituyentes orgánicos</b>	
Carbohidratos	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Grasas animales, aceites y grasa.	Aguas residuales domésticas e industriales.
Pesticidas	Residuos agrícolas.
Compuestos orgánicos volátiles	Aguas residuales domésticas e industriales.
<b>Constituyentes inorgánicos</b>	
Alcalinidad	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea.
Cloruros	Aguas residuales domésticas, agua de suministro, infiltración de agua subterránea.
Metales pesados	Vertidos industriales.
Nitrógeno	Residuos agrícolas y residuales domésticas.
pH	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales.
Fósforo	Aguas residuales domésticas, industriales y comerciales; aguas de escorrentía.
Azufre	Aguas de suministro, aguas residuales domésticas, comerciales e industriales.
<b>Gases:</b>	
Metano	Descomposición de residuos domésticos.
Oxígeno	Descomposición de residuos domésticos.
<b>Contribuyentes biológicos</b>	
Plantas	Cursos de agua y plantas de tratamiento de agua residual.
<b>Protistas:</b>	
Eubacterias	Aguas residuales domésticas, infiltración de agua superficial, plantas de tratamiento.
Virus	Aguas residuales domésticas.

## 2.1 Sistemas de tratamiento biológico

Todos los procesos biológicos que se emplean en el tratamiento del agua residual, tienen su origen en fenómenos y procesos que se producen en la naturaleza” [29].

Entre los procedimientos de tratamiento de agua residual tradicionales están los sistemas de lodos activados (biomasa en suspensión), [27]. “Los objetivos del tratamiento biológico son tres: a) Reducir el contenido en materia orgánica de las aguas, b) Reducir su contenido en nutrientes, y c) Eliminar los patógenos y parásitos. Estos objetivos se logran por medio de procesos aeróbicos y anaeróbicos, en los cuales la materia orgánica es metabolizada por diferentes cepas bacterianas” [29].

“En el metabolismo bacteriano juega un papel fundamental el elemento receptor de electrones en los procesos de oxidación de la materia orgánica. Este aspecto, además, tiene una importante incidencia en las posibilidades de aplicación al tratamiento de aguas. Atendiendo a cuál es dicho receptor de electrones distinguimos tres casos:

### **Sistemas aerobios**

La presencia de  $O_2$  hace que este elemento sea el aceptor de electrones, por lo que se obtienen unos rendimientos energéticos elevados, provocando una importante generación de fangos, debido al alto crecimiento de las bacterias aerobias. Su aplicación a aguas residuales puede estar muy condicionada por la baja solubilidad del oxígeno en el agua.

### **Sistemas anaerobios**

En este caso el aceptor de electrones puede ser el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) o parte de la propia materia orgánica, obteniéndose como producto de esta reducción el carbono en su estado más reducido, metano ( $CH_4$ ). La utilización de este sistema tendría; como ventaja importante, la obtención de un gas combustible [30].

### **Sistemas anóxicos**

Se denominan así los sistemas en los que la ausencia de  $O_2$  y la presencia de nitrato ( $NO_3^-$ ) hacen que este último elemento sea el aceptor de electrones, transformándose, entre otros, en  $N_2$ , elemento completamente inerte. Por tanto, es posible, en ciertas condiciones, conseguir una eliminación biológica de nitratos (desnitrificación) [3].

## **2.1.1 Procesos biológicos aerobios**

Son muchas las posibilidades de tratamiento:

### **2.1.1.1 Cultivos en suspensión**

Proceso de fangos activados (lodos activados), y modificaciones en la forma de operar: aireación prolongada, contacto-estabilización, reactor discontinuo secuencial (SBR).

### **2.1.1.2 Cultivos fijos**

Los microorganismos se pueden inmovilizar en la superficie de sólidos (biomasa soportada), destacando los filtros percoladores (también conocidos como lechos bacterianos o filtros biológicos).

## **2.2 Tratamiento de lodos activados (procesos aerobios)**

### **2.2.1 Lodos activados: Proceso básico**

Consiste en poner en contacto en un medio aerobio, normalmente en una balsa aireada, el agua residual con flóculos biológicos previamente formados, en los que se adsorbe la materia orgánica y donde es degradada por las bacterias presentes. Junto con el proceso de degradación, y para separar los flóculos del agua, se ha de llevar a cabo una sedimentación, donde se realiza una recirculación de parte de los fangos, para mantener una elevada concentración de microorganismos en el interior de reactor, además de una purga equivalente a la cantidad crecida de organismos [3].

Dentro de los parámetros básicos de funcionamiento, uno muy importante es la aireación. La solubilidad del oxígeno en el agua es pequeña (en torno a 8 - 9 mgO<sub>2</sub>/L dependiendo de presión y temperatura) por lo que será necesario asegurar el suministro a los microorganismos, utilizando aireadores superficiales, capaces de suministrar 1 kgO<sub>2</sub>/kW·h, o bien difusores. El valor mínimo de operación aconsejable de concentración de oxígeno disuelto (OD) es 2 mg/L. El consumo eléctrico en esta operación será importante dentro de los costos de operación del proceso.

Otro parámetro clave en el proceso se refiere al parámetro A/M, algunas veces denominada I, intensidad de carga. Se refiere a la relación entre la carga orgánica alimentada y la cantidad de microorganismos disponibles en el sistema, con unidades kg DBO<sub>5</sub> (o DQO)/kgSSV·d.

Es un parámetro de diseño fundamental, teniendo un valor óptimo entre 0.3 - 0.6 para las condiciones más convencionales de funcionamiento. Además, tiene una influencia determinante en la buena sedimentación posterior. La denominada “edad celular” también es un parámetro importante. Se refiere al tiempo medio que permanecen los fangos (flóculos, microorganismos) en el interior del sistema. Esta magnitud suele tener un valor de 5 - 8 días en condiciones convencionales de operación [3].

### **2.2.2 Lodos activados: Modificaciones del proceso básico [3]**

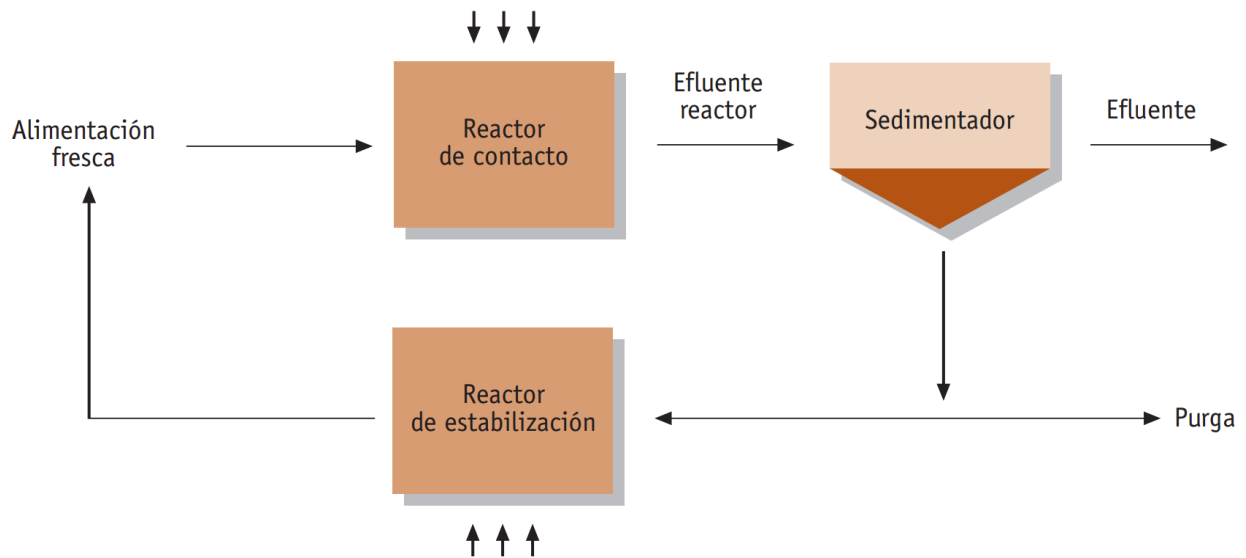
Son procesos de fangos activados, pero se diferencian en la forma de operar.

#### **2.2.2.1 Aireación prolongada**

Se suele trabajar con relaciones A/M más pequeñas (mayores tiempos de residencia), consiguiendo mayor rendimiento en la degradación de materia orgánica. Otra ventaja añadida es la pequeña generación de fangos de depuradora. Es interesante su utilización, además, cuando se pretendan eliminar compuestos con nitrógeno simultáneamente con la materia orgánica.

#### **2.2.2.2 Contacto estabilización**

En el reactor de aireación se suele trabajar con menores tiempos de residencia (sobre una hora) pretendiendo que se lleve a cabo solo la adsorción de la materia orgánica en los flóculos. La verdadera degradación se realiza en una balsa de aireación insertada en la corriente de recirculación de fangos, tal y como muestra la Figura 6, y donde la concentración de fangos es mucho más elevada que en el primer reactor. Es interesante esta opción cuando buena parte de la materia orgánica a degradar se encuentra como materia en suspensión.



**Figura 6. Proceso biológico de contacto-estabilización [3]**

“Una planta de lodos activados es un sistema de mezcla completa. Su nombre proviene de la producción de una masa activada de microorganismos capaz de estabilizar un residuo en medio aerobio. Este método está provisto de un sistema de recirculación y eliminación de lodos. El ambiente aerobio en el reactor se consigue mediante el uso de aireadores mecánicos, que también sirven para mantener el líquido en estado de mezcla completa. Al cabo de un periodo determinado de tiempo, la mezcla de las nuevas células con las antiguas se conduce hasta un tanque de sedimentación para ser separados por sedimentación del agua residual tratada. Una parte de las células sedimentadas se recirculan para mantener en el reactor la concentración de células deseadas, mientras que la otra parte se purga del sistema” [31].

Con este tipo de plantas de tratamiento se obtiene una importante reducción de la DBO, nitrógeno, fósforo y todos los componentes orgánicos; esto porque tales elementos son degradados por los microorganismos para alimentarse y crear nuevas colonias de bacterias [10].

### **2.2.2.3 Tratamiento de lodos activados de aireación extendida**

El concepto de lodos activados en su modalidad de aireación prolongada o extendida es una variante simplificada del sistema convencional de lodos activados.

La diferencia radica en que la aireación extendida utiliza mayor volumen de tanque de aireación y así elimina la necesidad de otras unidades de tratamiento como clarificador primario y digester de lodo. El tamaño del tanque de aireación propio de la modalidad de aireación extendida también le proporciona al sistema mejor capacidad de respuesta ante variaciones de caudal y carga orgánica. La aireación extendida provee suficiente tiempo de contacto en el interior del tanque para favorecer una excelente estabilización de los lodos reduciendo así su volumen y facilitando su manejo posterior [10].

Los flóculos formados en el tanque de oxidación biológica, pasan al tanque de sedimentación, debido a que adquieren mayor peso, por gravedad precipitan al fondo de este tanque y el agua se clarifica por flujo ascendente, recolectándose el agua clara en otro tanque, mientras que los flóculos que pasaron al fondo, una parte se recircula nuevamente a los tanques de oxidación biológica para mantener el equilibrio [32]

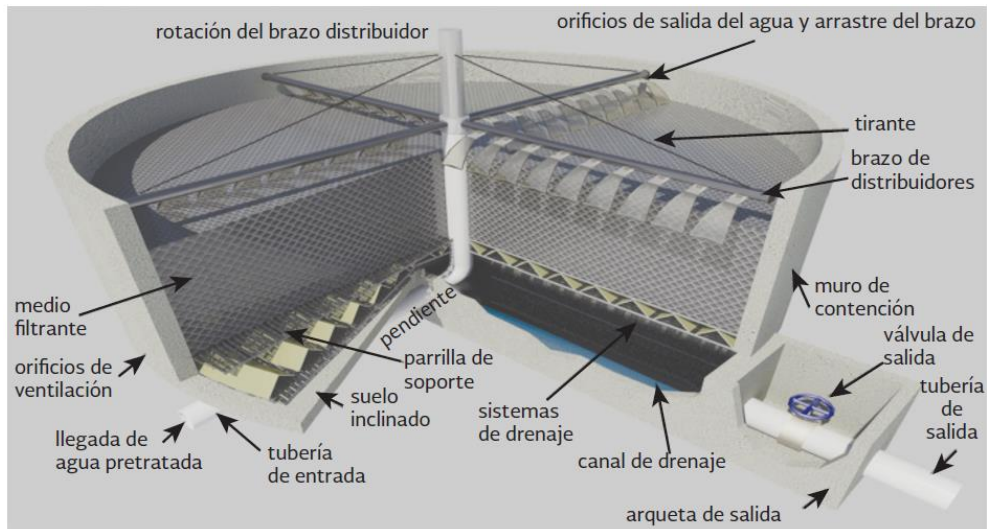
#### **2.2.2.4 Procesos aerobios con biomasa soportada**

Otra de las formas para conseguir concentraciones suficientes de microorganismos, sin necesidad de recirculación, es favoreciendo su crecimiento en la superficie de sólidos. Se evitan de esta forma los posibles problemas en la sedimentación y recirculación de fangos, frecuente en los procesos clásicos de fangos activados. Sin embargo, el aporte de oxígeno será de nuevo un factor importante, consiguiéndose en este caso en la distribución del líquido, o por movimiento del sistema [3].

#### **2.2.2.5 Filtros percoladores**

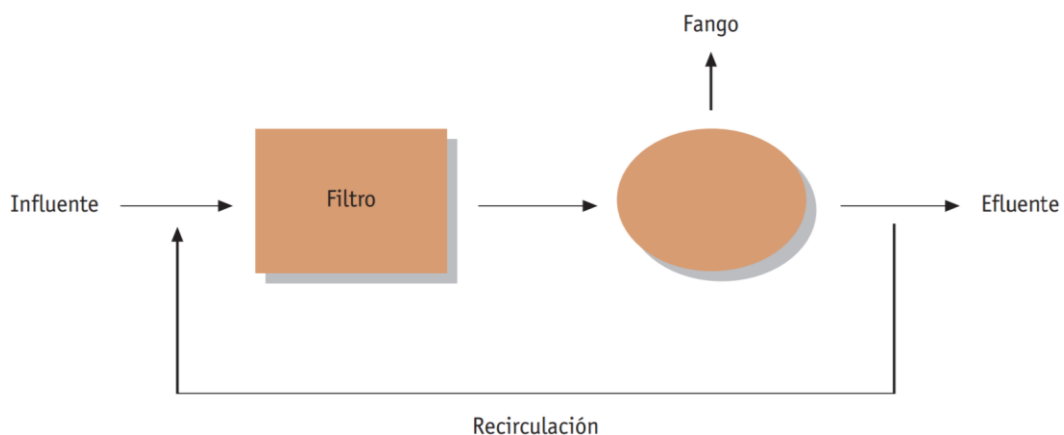
También denominados filtros biológicos o lechos bacterianos. Son los sistemas aerobios de biomasa inmovilizada más extendidos en la industria. Suelen ser lechos fijos de gran diámetro, rellenos con rocas o piezas de plástico o cerámica con formas especiales para desarrollar una gran superficie como lo muestra la Figura 7. Sobre la superficie crece una fina capa de biomasa, sobre la que se dispersa el agua residual a tratar, que moja en su descenso la superficie. Al mismo tiempo, ha de quedar espacio suficiente para que circule aire, que asciende de forma natural.

El crecimiento de la biomasa provoca que parte de los microorganismos se desprendan de la superficie; y, por lo tanto, seguirá siendo necesaria una sedimentación posterior para su separación del efluente [3].



**Figura 7. Composición típica de un filtro percolador [4]**

En general también se realiza una recirculación de parte del efluente limpio, una vez producida la separación. Un esquema sencillo se muestra en la Figura 8. En estos sistemas, la velocidad de carga orgánica es el parámetro más importante, teniendo rangos de aplicación en la industria de 30 a 10,000 kgDBO<sub>5</sub>/día y 100 m<sup>3</sup> de reactor, siendo los tamaños muy variables (de 2 hasta 10 m de altura) [3].



**Figura 8. Diagrama de operación típico de un filtro percolador [3]**

### **2.2.2.6 Contactores biológicos rotatorios (CBR): Biodiscos**

El sistema de oxidación biológica aprovecha uno o más discos rotativos para la eliminación de la sustancia orgánica contenida en las aguas residuales [33]. Cada rodillo se compone de un árbol en el cual se insertan discos de polipropileno de número variable dependiendo del modelo mostrado en la Figura 9. Mediante un reductor de velocidad, el árbol gira muy lentamente (uno por cada cinco revoluciones al minuto, dependiendo del modelo y de las características de las aguas residuales). Los discos se sumergen parcialmente (aproximadamente el 40 % de su diámetro) en una cuba por la que pasan las aguas residuales a depurar. El contacto entre aguas residuales y discos favorece la formación de flora bacteriana sobre éstos últimos. La flora, gracias a la rotación continua de los discos es sumergida alternativamente en el líquido (donde recoge la sustancia orgánica necesaria para su nutrición) y es llevada a contacto con el aire (donde se satura de oxígeno, otro elemento fundamental del proceso de oxidación biológica). La capa de flora bacteriana, una vez agotado su propio ciclo vital, se separa de forma autónoma de la superficie de los discos bajo forma de flóculos de fácil sedimentación.

En el campo de tratamientos de aguas de desecho, los llamados sistemas biológicos son ampliamente utilizados, ya que con ellos se logra lo que la naturaleza haría por sí misma. La intensidad del tratamiento depende, además de las condiciones del problema, del mayor o menor grado de preservación que exigen los cuerpos receptores para así conservar su calidad físico-química y biológica que las circunstancias y el medio le imponen. El contactor biológico de rotación (CBR) es un reactor de tratamiento por crecimiento biológico, aplicable a residuos acuosos [33].

La depuración biológica tendrá lugar por medio de CBR, mas popularmente conocidos como biodiscos, que se alojaran en varios depósitos colocados en paralelo para poder realizar un proceso de depuración en serie y en varias etapas. Los biodiscos son como su nombre indica unos discos, generalmente de PVC, polietileno o polipropileno, que están girando parcialmente sumergidos en el agua residual y que sirven de soporte para que las colonias de bacterias se adhieran y formen una biomasa constante y confinada a una superficie determinada, de modo que si no se producen

desprendimientos por mal funcionamiento o vertidos accidentales que contengan tóxicos o inhibidores, se trata de sistemas muy estables y con escasas variaciones en su rendimiento [33].

Los CBR, son sistemas de tratamiento en los que los microorganismos responsables de la degradación de la materia orgánica se hallan adheridos a un material soporte, que gira semisumergido en el agua a depurar. Con ello se pone a la biomasa en contacto, alternativamente, con el agua residual a tratar y con el oxígeno atmosférico. Los CBR constituyen una alternativa tecnológica para la depuración de aguas residuales en pequeñas localidades. A diferencia de otros procesos, los CBR constituyen un equipo electro-mecánico que requiere energía para su funcionamiento. Los CBR constan de una serie de discos paralelos planos muy juntos, cubiertos de bacterias aerobias. La rotación de los discos mezcla y aérea la mezcla de biomasa y aguas residuales. La sustancia orgánica disuelta y el amoníaco son degradados por la biomasa. La “babaza” excesiva (biomasa) que se sedimenta en el tanque de sedimentación requiere disposición. Se emplea una serie de CBR dependiendo de la concentración del afluente, el grado de tratamiento deseado y las actividades posteriores de tratamiento previstas [33].

Estos contactores pueden utilizarse para el tratamiento de los residuos acuosos diluidos que contienen productos orgánicos biodegradables, incluyendo disolventes y productos orgánicos halogenados. Una vez obtenida la adecuada biomasa aclimatada, temperatura y nutrientes, los contactores son capaces de producir efluentes relativamente libres de compuestos tóxicos. El contactor consiste en una serie de discos de poliestireno, cloruro de polivinilo o materiales similares estrechamente unidos. Inicialmente, los discos se sumergen parcialmente en el residuo y lentamente se van girando hasta que se consigue un crecimiento microbiano uniforme de 2 a 4 mm de espesor. Este movimiento continuo de los discos pone alternativamente en contacto a la masa microbiana en crecimiento con la materia orgánica del residuo y con la atmósfera para la absorción de oxígeno. El movimiento mantiene la biomasa en condición anaerobia [33]. Los CBR giran muy despacio, activados por un reductor de velocidad, de tal manera que una parte de su superficie se encuentra permanentemente sumergida en el líquido.

Con el giro de los discos, su superficie está alternativamente sujeta a la acción del aire y del agua, lo que permite la formación de una película biológica activa de microorganismos, o biomasa, suspendida en ambas caras de los discos. Esta capa activa, se autorregula oxidando los elementos contaminantes del agua a depurar. Los microorganismos utilizan la carga contaminante (medida en DBO) como sustrato (alimento), y al hacerlo se multiplican, atendiendo un espesor de biomasa específico que optimiza el proceso [33].



**Figura 9. Esquema de biodisco [33]**

#### **2.2.2.6.1 Descripción de la tecnología**

La tecnología consta de una serie de procesos integrados por una laguna anaerobia que actúa como sedimentador y digestor de la materia orgánica sedimentable, seguida por el contactor biológico, que consiste en un disco circular conformado por numerosas láminas que incrementan su área superficial, el cual gira lentamente, y se encuentra parcialmente inmerso en el agua residual. Una película biológica crece en las láminas y, debido a la elevada área superficial, existe una gran capacidad de adsorción y estabilización de la materia orgánica. Los sólidos sedimentan en el decantador, y los lodos o fangos sedimentados son transferidos a la laguna anaerobia. Los CBR consisten en una serie de discos circulares, generalmente de tipo plástico, ubicados muy cerca uno de otro, con un diámetro típico de 3.6 metros y dispuestos sobre un eje horizontal que rota lentamente [33].

Aproximadamente el 40 % del disco está sumergido en un estanque que contiene el agua a tratar, de tal manera que la película de biomasa que crece sobre la superficie de los discos está alternadamente dentro y fuera del agua mientras el CBR rota. Cuando los microorganismos están sumergidos en el interior del efluente, absorben la materia orgánica y cuando están en la superficie consumen el oxígeno que requieren. Si bien estos equipos dispuestos en serie entregan mejores rendimientos, no son muy utilizados ya que presentan problemas de tipo mecánico. Son recomendados cuando la carga volumétrica es variable ya que es más sencillo, en comparación con los biofiltros, mantener la película húmeda. Las ventajas de este reactor son: capacidad para resistir a los «shock» de cargas, tiempos de retención hidráulica cortos, bajos requerimientos de potencia, y construcción y operación simples. Los CBR proveen un método excepcionalmente suave de inmovilización natural para los hongos filamentosos, ya que estos últimos pueden exhibir una fuerte afinidad por las superficies de cualquier material (orgánico o inorgánico). La adherencia y la colonización superficial son características importantes de la adaptación natural de estos microorganismos. También existen varios métodos disponibles para la inmovilización artificial de células, siendo la adsorción y el atrapamiento los más extensamente usados para hongos filamentosos [33]. Las esporas inactivas o pregerminadas han probado ser un adecuado inóculo para los CBR, ya que éstas se unen fácilmente a las superficies de los discos e inician el crecimiento de la película.

### **2.3 Procesos biológicos anaerobios**

El tratamiento anaerobio es un proceso biológico ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales [3]. Cuando éstas tienen una alta carga orgánica, se presenta como única alternativa frente al que sería un costoso tratamiento aerobio, debido al suministro de oxígeno. El tratamiento anaerobio se caracteriza por la producción del denominado “biogás”, formado fundamentalmente por metano (60 – 80 %) y dióxido de carbono (40 – 20 %) y susceptible de ser utilizado como combustible para la generación de energía térmica y/o eléctrica. Además, solo una pequeña parte de la DQO tratada (5 – 10 %) se utiliza para formar nuevas bacterias, frente al 50 – 70 % de un proceso aerobio.

Sin embargo, la lentitud del proceso anaerobio obliga a trabajar con altos tiempos de residencia, por lo que es necesario diseñar reactores o digestores con una alta concentración de microorganismos [3]. Realmente, es un complejo proceso en el que intervienen varios grupos de bacterias, tanto anaerobias estrictas como facultativas, en el que, a través de una serie de etapas y en ausencia de oxígeno, se desemboca fundamentalmente en la formación de metano y dióxido de carbono. Cada etapa del proceso, que se describen a continuación, la llevan a cabo grupos distintos de bacterias, que han de estar en perfecto equilibrio. Hidrólisis: La hidrólisis es la ruptura de moléculas grandes, solubles e insolubles, en moléculas de menor tamaño que pueden ser transportadas dentro de las células y metabolizadas. En este proceso no se produce metano, y en la mayor parte de los casos supone una etapa que se desarrolla lentamente [3].

### **2.3.1 Formación de ácidos (acidogénesis) y acetato (acetogénesis):**

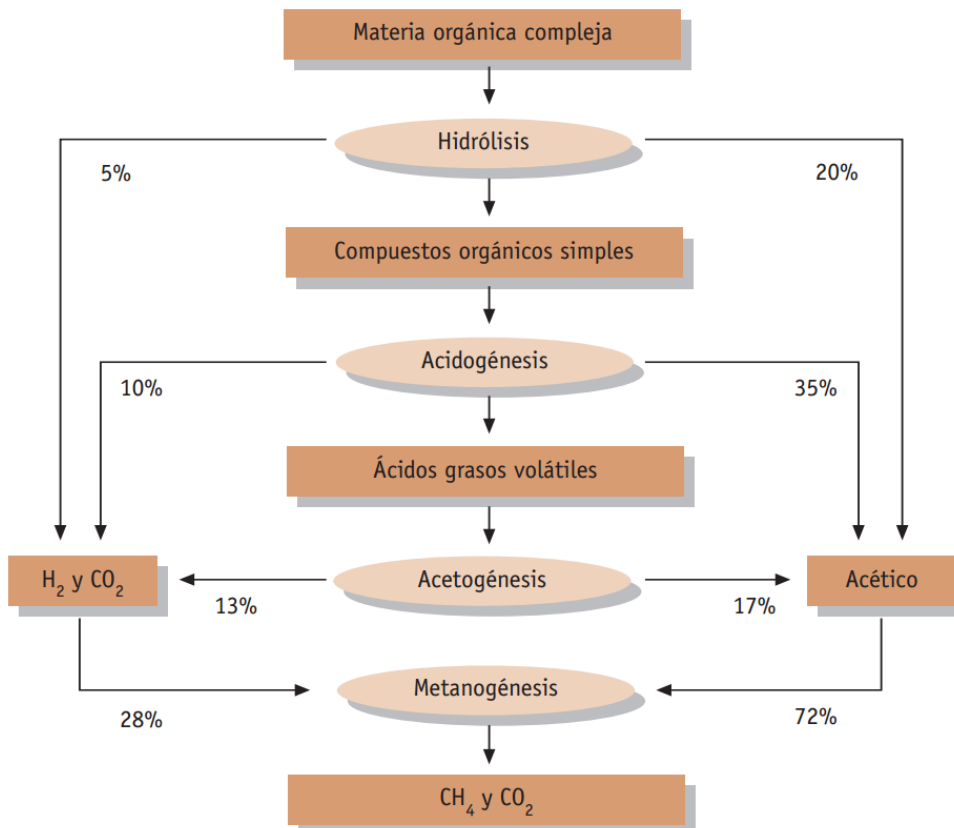
Los productos finales del hidrólisis son transformados en ácidos orgánicos de cadena corta, otros compuestos de bajo peso molecular, hidrógeno y dióxido de carbono. Estas bacterias son altamente resistentes a variaciones en las condiciones ambientales. Por ejemplo, aunque el pH óptimo para el desarrollo de su actividad metabólica es de 5 a 6, los procesos anaerobios generalmente son conducidos a pH 7, y aún en estas condiciones su actividad metabólica no decae [3].

### **2.3.2 Metanogénesis**

La formación de metano, siendo éste el último producto de la digestión anaerobia, ocurre por dos grandes rutas: La primera de ellas, es la formación de metano y dióxido de carbono a partir del principal producto de la fermentación, el ácido acético. Las bacterias que consumen el ácido acético se denominan bacterias acetoclastas. La reacción, planteada de forma general, es:  $\text{CH}_3 \text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$

Algunas bacterias metanogénicas son también capaces de usar el hidrógeno para reducir el dióxido de carbono a metano (metanogénicas hidrogenoclastas) según la reacción [3]:  $4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$

La metanogénesis es la etapa crítica en el proceso de degradación, por las características de las bacterias que la llevan a cabo, y por ser la más lenta de todo el proceso [29]. En buena medida, la digestión anaerobia se ha de llevar a cabo en las condiciones óptimas para el buen funcionamiento de estas bacterias metanogénicas. Actualmente está ampliamente aceptado que la degradación de la materia orgánica sigue una distribución como la detallada, y que se muestra resumida en la Figura 10 [3].



**Figura 10. Esquema de la ruta de degradación anaerobia [3]**

Entre las ventajas más significativas del tratamiento anaerobio frente al aerobio cabe destacar la alta eficacia de los sistemas, incluso en aguas residuales de alta carga, el bajo consumo de energía, pequeña producción de fangos y por tanto, pequeño requerimiento de nutrientes, así como su eficacia ante alteraciones importantes de carga y posibilidad de grandes periodos de parada sin alteración importante en la población bacteriana.

Sin embargo, como desventajas caben destacar la baja efectividad en la eliminación de nutrientes y patógenos, generación de malos olores y la necesidad de un post-tratamiento, generalmente aerobio, para alcanzar los niveles de depuración demandados, así como los generalmente largos periodos de puesta en marcha [3].

### **2.3.3 Condiciones de operación**

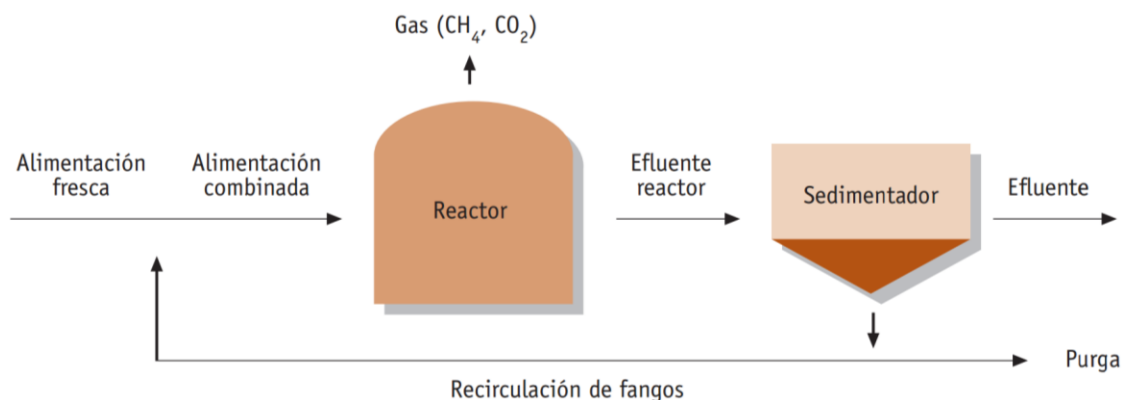
Tanto las variables físicas como las químicas influyen en el hábitat de los microorganismos. En los procesos anaerobios es importante tener en cuenta la influencia de factores medioambientales. Las bacterias formadoras de metano son las más sensibles a estos factores, por lo que un funcionamiento inadecuado de las mismas puede causar una acumulación de productos intermedios (ácidos) y desestabilizar por completo el sistema. Entre las variables más importantes se encuentran la temperatura, el pH y la disponibilidad de nutrientes. Por otro lado, la mezcla es un factor importante en el control del pH y en la uniformidad de las condiciones medioambientales. Una buena mezcla distribuye las propiedades tampón a todo el reactor y evita la concentración de metabolitos intermedios que pueden ser causa de inhibición para las bacterias metanogénicas [3]. Los parámetros de seguimiento y control de un digestor anaerobio pueden situarse en la fase sólida (materiales orgánicos e inorgánicos en suspensión); fase líquida (parámetros fisicoquímicos y composición) y gaseosa (producción y composición) Estos parámetros pueden tener diferente significado y utilidad según la situación particular del equipo, que puede encontrarse en un período de puesta en marcha, en estado estacionario para sistemas continuos, o en sistemas discontinuos. Entre los parámetros de operación se pueden mencionar velocidad de carga orgánica, toxicidad, velocidad volumétrica de flujo, TRH, concentración de sólidos volátiles en el reactor, producción de fangos, etc. [3].

### 2.3.4 Reactores utilizados

El desarrollo del tratamiento anaerobio ha sido paralelo al desarrollo del tipo de reactor donde se lleva a cabo el proceso. Dado el bajo crecimiento de las bacterias metanogénicas y la lentitud con la que llevan a cabo la formación de metano, es necesario desarrollar diseños en los que se consiga una alta concentración de microorganismos determinando los SSV en su interior si se quiere evitar el utilizar reactores de gran tamaño. Para conseguirlo, habitualmente es necesario que el TRH sea inferior al tiempo de retención de sólidos (TRS) y esto se puede hacer por distintos medios. A todos estos reactores se les denomina de alta carga, dado que son los únicos que pueden tratar aguas con elevada carga orgánica de una forma viable. Dando un repaso a los más utilizados, podemos hablar de [3]:

#### 2.3.4.1 Reactor de contacto (mezcla completa con recirculación de biomasa)

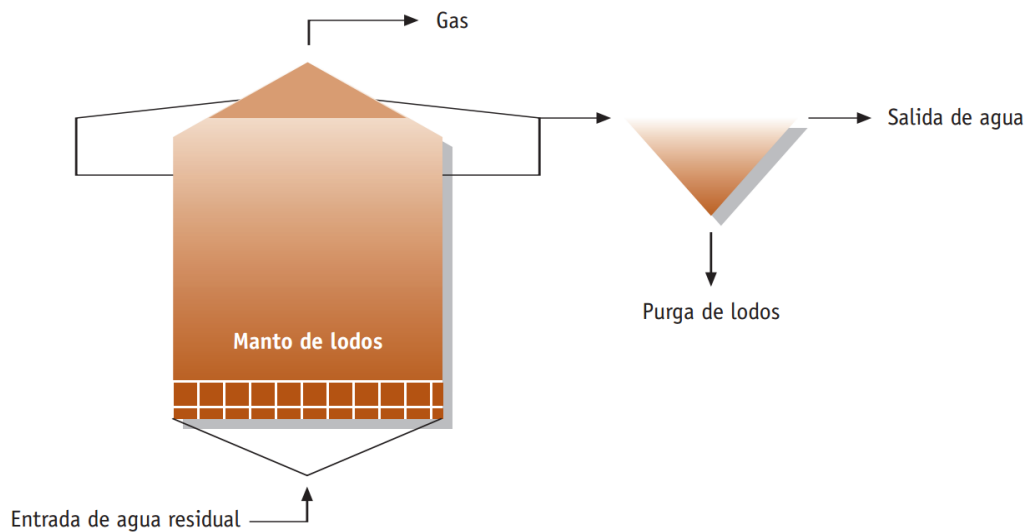
Se trata del equivalente al proceso de fangos activados aerobio. Consiste un tanque cerrado con un agitador donde tiene una entrada para el agua residual a tratar y dos salidas, una para el biogás generado y otra para la salida del efluente. Este efluente se lleva a un decantador donde es recirculada la biomasa de la parte inferior del decantador al reactor, para evitar la pérdida de la misma. Los principales problemas que presentan radican en la necesidad de recircular los lodos del decantador y de una buena sedimentación de los mismos la Figura 11 representa esquemáticamente las características de un reactor de este tipo [3].



**Figura 11. Reactor anaerobio de contacto [3]**

### 2.3.4.2. Reactor de manto de lodos y flujo ascendente

Conocidos por sus siglas UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), estos reactores solucionan el problema de recirculación de lodos al aumentar la concentración de biomasa en el reactor manteniéndola en su interior como lo muestra la Figura 12.

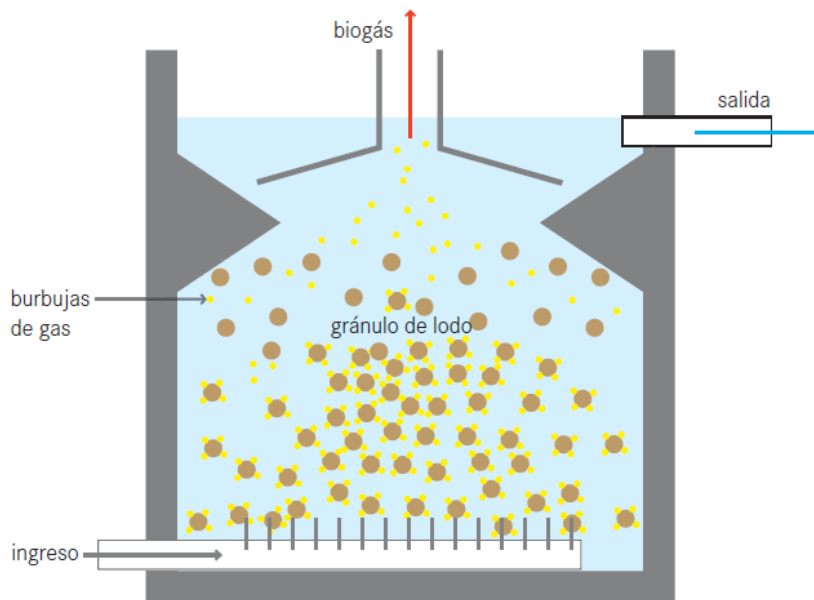


**Figura 12. Reactor UASB [3]**

Estos reactores fueron desarrollados en Holanda, por el Profesor Lettinga en la década de los 80. Se trata de un reactor cuyo lecho está formado por gránulos de biomasa [34]. Estos gránulos son porosos y con una densidad poco mayor que la del líquido, con lo que se consigue un buen contacto de éste con la biomasa. Los reactores suelen tener en su parte superior un sistema de separación gas-sólido-líquido, puesto que se acumula biogás alrededor de las partículas [35], éstas manifiestan una tendencia a ascender separándose con estos dispositivos. Se consigue una alta concentración de biomasa dentro del reactor que conlleva una elevada velocidad de eliminación de materia orgánica con rendimientos elevados de depuración. El agua residual se introduce por la parte inferior como lo muestra la Figura 13, homogéneamente repartida y ascendiendo lentamente a través del manto de lodos (gránulos). Los principales problemas que tiene este tipo de reactor son: puesta en marcha, ya que se ha de conseguir que se desarrollen gránulos lo más estables posibles, la incidencia negativa que tiene el que el agua residual a tratar contenga una gran cantidad de sólidos en suspensión y la deficiente mezcla en la fase líquida que se logra [36].

Este último problema se soluciona de una forma eficaz recirculando parte del gas producido e inyectándolo en la parte inferior de equipo, consiguiendo una expansión del manto de lodos, y por lo tanto, una buena mezcla. A estos reactores se les denomina EGSB (Expanded Granular Sludge Blanket).

Habitualmente la relación altura/diámetro es mayor que para los convencionales UASB siendo capaces de alcanzar mayores cargas orgánicas (10 - 25 kg DQO/m<sup>3</sup>·día). También recientemente se ha desarrollado un sistema semejante denominado Internal Circulation (IC). Estos tipos de reactores han conseguido una muy alta implantación en el mercado, mostrándose como los más fiables para todo tipo de aguas residuales de alta carga, especialmente las que tiene un bajo contenido de sólidos en suspensión [3].

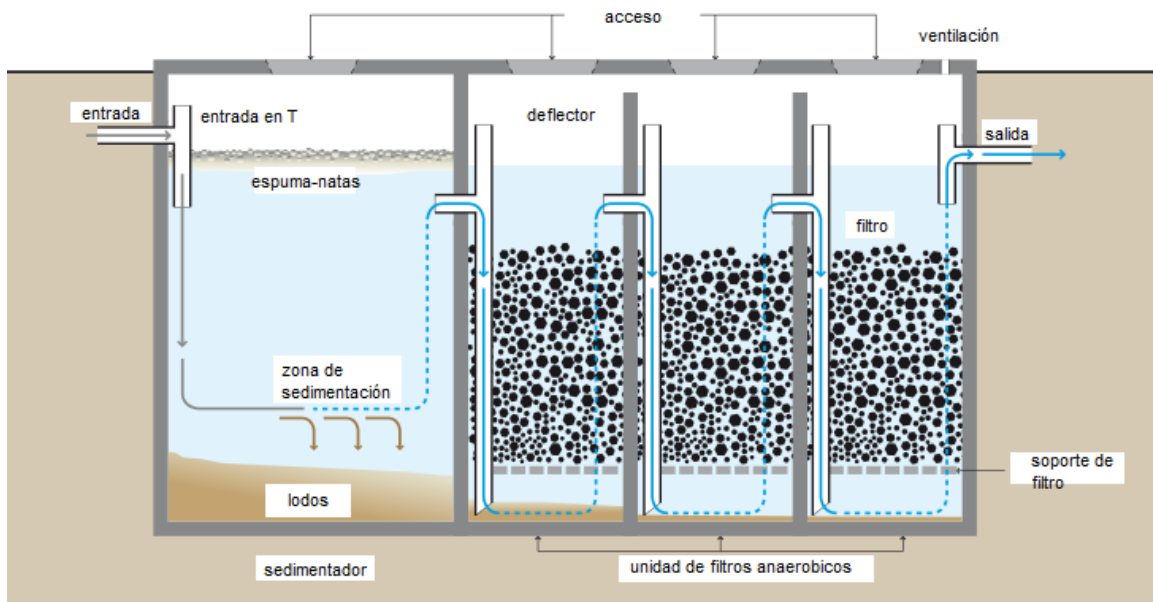


**Figura 13. Corte en reactor UASB [37]**

#### **2.3.4.3. Filtro anaerobio (FA)**

En este caso, los microorganismos anaerobios se desarrollan sobre la superficie de un sólido formando una biopelícula de espesor variable como lo muestra la Figura 14. El sólido permanece inmóvil en el interior del equipo, habitualmente una columna, constituyendo un lecho fijo.

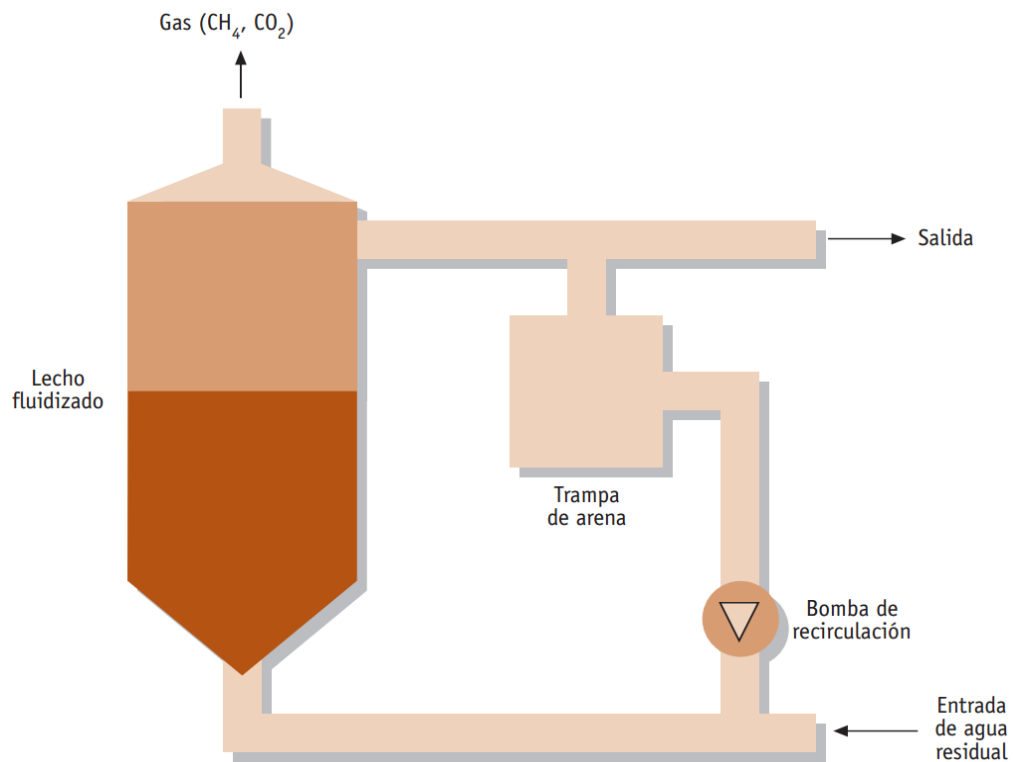
El agua residual se hace circular a través del lecho, bien con flujo ascendente o bien descendente, donde entra en contacto con la biopelícula. Son sistemas tradicionalmente utilizados en muchas depuradoras de aguas residuales industriales con alta carga orgánica. Resisten muy bien alteraciones de carga en el afluente, pero no aceptan gran cantidad de sólidos en suspensión con el afluente. El rango típico de cargas tratadas desde 5 - 15 kg DQO/m<sup>3</sup>.d [3].



**Figura 14. Filtro anaerobio de flujo ascendente [38]**

#### **2.3.4.4. Reactor anaerobio de lecho fluidizado (RALF)**

Son columnas en cuyo interior se introducen partículas de un sólido poroso (arena, piedra pómez, biolita, etc.) y de un tamaño variable (1 - 5 mm) con el objetivo de que sobre su superficie se desarrolle una biopelícula bacteriana que lleve a cabo la degradación anaerobia. Para que las partículas permanezcan fluidizadas (en suspensión), es necesario realizar una recirculación del líquido como lo muestra la Figura 15, para que la velocidad del mismo en el interior de la columna sea suficiente como para mantener dichas partículas expandidas o fluidizadas. Este tipo de equipos se han comprobado como muy eficaces, al menos en escala laboratorio o planta piloto. Se consiguen muy altas concentraciones de microorganismos, así como una muy buena mezcla en el lecho. Sin embargo, su implantación a nivel industrial no ha alcanzado las expectativas que se crearon [3].



**Figura 15. Filtro anaerobio de lecho fluidizado [3].**

#### **2.3.4.5. Otros tipos de reactores**

Más que otros tipos de reactores, existen distintas formas de operar, de llevar a cabo la degradación anaerobia. Tenemos por una parte los reactores discontinuos secuenciales (SBR, Sequencing Batch Reactors) mostrados en la Figura 16, equipo en el que de forma secuencial se lleva a cabo el llenado, reacción, sedimentación y evacuación del agua depurada, para volver otra vez a iniciar el ciclo, todo ello en un mismo equipo. Como ventaja fundamental tiene el menor requerimiento espacio, así como una mayor flexibilidad en la forma de operar; por ejemplo, en el caso de flujos estacionales, ayudado por la gran capacidad de las bacterias para estas situaciones [3].

Por otro lado, especialmente para el caso en el que la materia orgánica a degradar sea compleja, y en el que la etapa de hidrólisis sea importante, se suele llevar a cabo la degradación en dos etapas, en dos reactores en serie.

En el primero se ponen las condiciones necesarias para que se realice la hidrólisis y acidificación de forma óptima (por ejemplo a pH = 6), sin formación de metano.

El efluente de este reactor, constituido fundamentalmente por ácidos de cadena corta, pasa al reactor metanogénico, donde las bacterias metanogénicas, mayoritarias, llevarán a cabo la metanización final del residuo. Estos equipos se han puesto en práctica desde hace tiempo, con éxito, incluso para la metanización de la fracción orgánica de los RSU, a menudo mezclados con lodos de depuradoras. Finalmente, en la Tabla 6 se muestran características y datos técnicos correspondientes a las distintas configuraciones de reactores anaerobios [3].

**Tabla 6. Condiciones de operación para distintos reactores anaerobios [3]**

Reactor	DQO de entrada (mg/L)	TRH (h)	Carga orgánica (kg DQO/m <sup>3</sup> día)	Eliminación de DQO (%)
De contacto	1,500 – 5,000	2 - 10	0.5 – 2.5	75 - 90
EGSB	5,000 – 15,000	4 - 12	15.0 - 25.0	75 - 85
FA	10,000 – 20,000	24 - 48	5.0 – 55.0	75 - 85
RALF	5,000 – 10,000	5 - 10	5.0 – 10.0	80 - 85

Además, existe la posibilidad de controlar el proceso con dos reactores que pueden funcionar alternativamente, de manera que el sistema garantice unos rendimientos siempre constantes también con cargas variables [39]. En consecuencia, se asegura la ausencia de emanaciones desagradables debidas a los picos de concentración de carga, que caracterizan las instalaciones tradicionales.

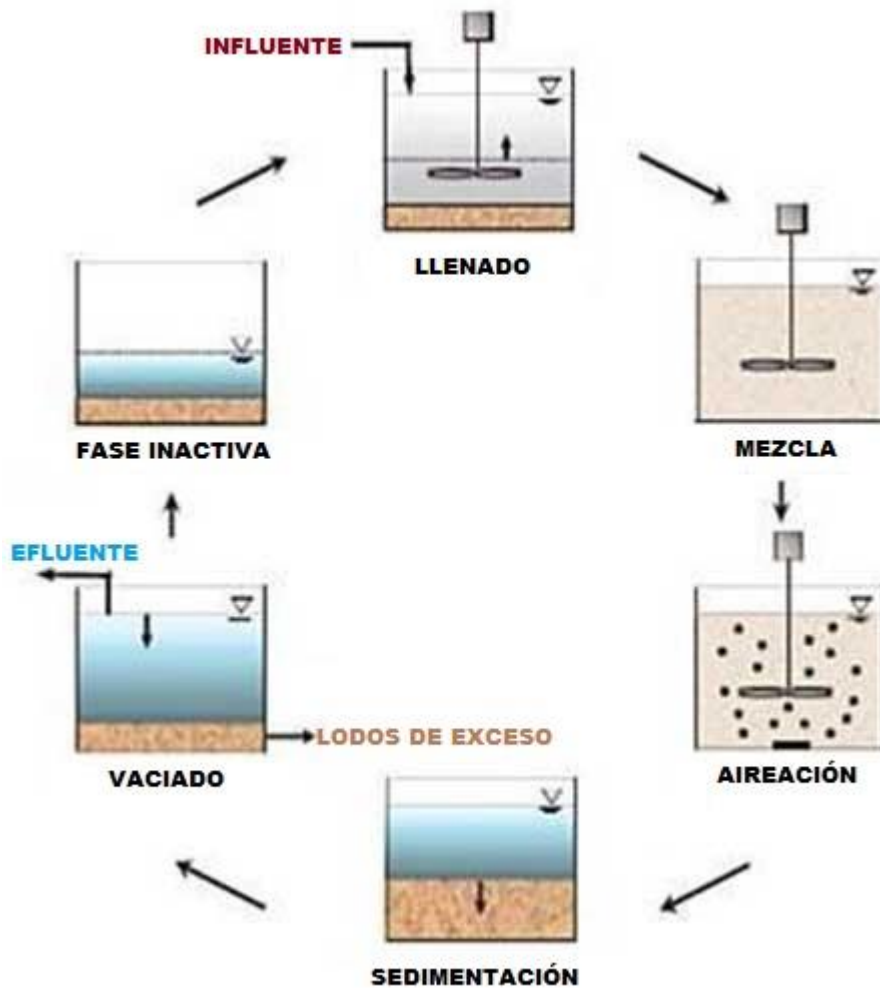


Figura 16. Fases del proceso de un reactor discontinuo secuencial [39]

### 2.3.4.5.1 Fases del proceso en un reactor discontinuo secuencial

#### 1) Llenado

Durante esta primera etapa el líquido residual se introduce gradualmente hasta alcanzar un nivel adecuado en el estanque a fin de acumular una gran cantidad de sustrato orgánico [40].

#### 2) Mezcla

Se accionan los mezcladores y comienza el proceso de desnitrificación, gracias a las bacterias facultativas que para su desarrollo necesitan condiciones anóxicas [40].

### **3) Aireación-mezcla**

La activación del sistema de aireación provee el oxígeno necesario para las reacciones biológicas aeróbicas con eliminación de DBO y transformación del nitrógeno amoniacal en nitratos [40].

### **4) Sedimentación**

Parada de los dispositivos de aereación y de mezcla. Este proceso se lleva a cabo en reposo absoluto, aprovechando toda la superficie del estanque SBR como estanque de sedimentación [40].

### **5) Vaciado y fase inactiva**

En esta fase se recoge gradualmente el efluente depurado y clarificado una vez realizada la sedimentación; el posible período de quietud coincide con el alejamiento del fango en exceso hacia la cuba de decantación [40].

## **2.4 Microbiología del proceso de tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados**

“Para proyectar un sistema de lodos activados correctamente y con las debidas garantías de buen funcionamiento, es necesario comprender la importancia de los microorganismos dentro del sistema. En la naturaleza, el papel clave de las bacterias es descomponer la materia orgánica producida por otros microorganismos vivos.

En el proceso de lodos activados, las bacterias son los microorganismos más importantes, ya que son los causantes de la descomposición de la materia orgánica en el afluente. En el reactor, o tanque de aireación, las bacterias aerobias o facultativas utilizan parte de la materia orgánica del agua residual con el fin de obtener energía para la síntesis de la materia orgánica en forma de células nuevas. En general, las bacterias que intervienen en el proceso de lodos activados incluyen los géneros *Pseudomonas*, *Zoogloea*, *Archromobacter*, *Flavobacterium*, *Nocardia*, *Bdellovibrio*, *Mycobacterium*, y las dos bacterias nitrificantes más comunes, los *Nitrosomas* y las *Nitrobacter*” [29].

“La nitrificación demanda oxígeno y los microorganismos nitrificantes se caracterizan por ser muy sensibles a las condiciones ambientales, crecer lento y ser relativamente intolerantes a bajas concentraciones de oxígeno” [41]. “Adicionalmente se pueden presentar diversas formas filamentosas tales como *Sphaerotilus*, *Beggiatoa*, *Thiothrix*, *Lecicothrix*, y *Geotrichum*. En tanto que las bacterias son los microorganismos que realmente degradan el residuo orgánico del afluente, las actividades metabólicas de otros microorganismos son, igualmente, importantes en el sistema de lodos activados, por ejemplo: los protozoos y rotíferos ejercen una acción del refinado de los efluentes. Los protozoos consumen las bacterias dispersas que no han floculado y los rotíferos consumen cualquier partícula biológica pequeña que no haya sedimentado. Del mismo modo que es importante que las bacterias descompongan el residuo orgánico tan pronto como sea posible, también lo es el que formen un flóculo adecuado, puesto que este punto constituye un requisito previo para la separación de los sólidos biológicos en la instalación de sedimentación. Se ha observado que cuando se aumenta el tiempo medio de retención celular mejoran las características de sedimentación del flóculo biológico. En el caso de las aguas residuales domésticas, los tiempos medios de retención celular necesarios para conseguir una buena sedimentación oscilan entre 3 y 4 días. Aunque se obtenga una excelente formación de flóculos, el efluente del sistema podría tener un alto contenido de sólidos biológicos, como consecuencia de un mal diseño de la unidad de sedimentación secundaria, mal funcionamiento de los dispositivos de aireación, o por la presencia de organismos filamentosos como el *Sphaerotilus*, los *E. coli* u hongos” [28]

# CAPÍTULO 3

## METODOLOGÍA

### 3.1 Revisión bibliográfica

Se obtuvo información sobre el sistema de tratamiento de aguas residuales de lodos activados con aireación extendida para conocer el estado del arte, normas aplicables para agua residual tratada de reúso, así como el manual de operación, reportes, bitácoras, informes de calidad del agua de la PTAR CETYS [8].

### 3.2 Caracterización del agua residual

Se tomaron muestras del agua residual en las diferentes unidades de proceso de la PTAR CETYS, se realizaron mediciones *in situ*, análisis de laboratorio y frotis del agua.

### 3.3 Muestreo

Se tomaron muestras imples para analizar coliformes fecales, materia flotante, DBO<sub>5</sub>, SST, cloro residual. Se tomaron al menos cuatro muestras simples, tomadas en días representativos mensualmente durante seis meses, como lo marca la Norma Mexicana NMX-AA-003-1980 [42].

### 3.4 Mediciones en campo

En campo, se realizaron las mediciones indicadas en la Tabla 7.

**Tabla 7. Parámetros medidos en campo**

Parámetro	Técnica metodológica	Equipo
pH	Electrométrico	Sonda YSI Mod 556
Temperatura	Electrométrico	Sonda YSI Mod 556
Caudal de afluente	Electromagnético	Endress + Hauser, proline 50W 4" $\phi$
Caudal de efluente	Mecánico	Dorot Modelo 80 LXLC de 3" $\phi$
OD	Electrométrico	Sonda YSI Mod 556
Cloro residual	Colorimétrico	Pocket colorimeter II Hach

### 3.5 Análisis de laboratorio

Los análisis de muestras de aguas recolectadas en la PTAR CETYS fueron efectuados en los laboratorios: Químico de CESP, Bioingeniería de la Facultad de Ingeniería y Química Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UABC. Los parámetros que fueron analizados se presentan en la Tabla 8 con su respectiva técnica metodológica.

**Tabla 8. Parámetro, técnica y método de análisis de aguas residuales en laboratorio**

Parámetro de laboratorio	Técnica	Método
DBO <sub>5</sub>	DBO <sub>5</sub>	NMX-AA-028-SCFI-2001 [43]
SSV	Gravimétrica	NMX-AA-034-SCFI-2001 [44]
SST	Gravimétrica	NMX-AA-034-SCFI-2001 [44]
Cloro residual	Colorimétrico	NMX-AA-108-SCFI-2001 [45]
Coliformes fecales	NMP	NMX-AA-42-1987 [46]

Los valores mensuales obtenidos de los parámetros se compararon con los límites máximos permisibles de la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 [13], estos parámetros y límites se indican en la Tabla 9.

**Tabla 9. Límites máximos permisibles en la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 [13]**

Límites máximos permisibles					
Promedio mensual					
Tipo de reúso	Coliformes fecales	Huevos de helminto (Huevos/Litro)	Grasas y aceites	DBO <sub>5</sub>	SST
	NMP/100 mL	H/L	mg/L	mg/L	mg/L
Servicio al público con contacto directo	240	1	15	20	20
Servicio al público con contacto indirecto u ocasional	1,000	5	15	30	30

### 3.6 Evaluación de las unidades de proceso de la PTAR CETYS

Con los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio se evaluaron las unidades de cada proceso en la planta. En la Tabla 10, se muestran los procesos unitarios que se evaluaron, así como sus parámetros.

**Tabla 10. Parámetros a evaluados por proceso unitario**

Proceso unitario	Parámetro	Unidades
Desbaste grueso	Separación de barras	cm
	Pérdida de carga	m
Bombeo de agua residual	Carga dinámica total	m
	Caudal	L/s
Desarenador	TRH	s
Tamizado	Tamaño de la malla	mm
Reactor aerobio	pH	-
	Temperatura	°C
	TRH	h
	Edad de lodos (TMRC)	d
	OD	mg/L
	A/M	mg DBO <sub>5</sub> /mg SSVLM.d
	Carga orgánica	kgDBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup> .d
	SSVLM	mg/L
Recirculación	%	
Sedimentador	TRH	h
	Carga superficial	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d
Desinfección	Tiempo de contacto	min
	Dosis de cloro	mg/L
Filtración	Tasa de filtración	GPM/ft <sup>2</sup>
Efluente	Cloro residual	mg/L
	Coliformes fecales	NMP/100 mL
	DBO <sub>5</sub>	mg/L
	SST	mg/L

### 3.7 Comparación de parámetros operacionales encontrados en la evaluación y los indicados en el diseño de la PTAR CETYS

En la evaluación de los procesos, fue necesario conocer primero los datos de entrada para posteriormente verificar la eficiencia del mismo con base en los resultados que presenta la unidad de tratamiento en operación.

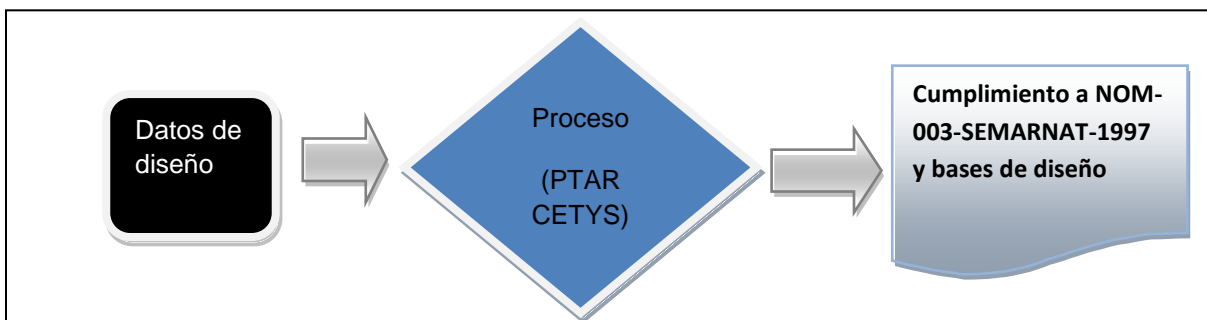
Por esta razón, para evaluar la PTAR CETYS fue importante tener la caracterización del agua cruda residual (afluente) a tratar y para las cuales fue diseñada. Los valores obtenidos de los parámetros en la caracterización del afluente se encuentran en la Tabla 11.

**Tabla 11. Caracterización del agua cruda residual en diseño de PTAR CETYS**

AFLUENTE	
PARÁMETRO	VALOR
Temperatura del agua	22 °C
Turbiedad	175 UNT
DBO <sub>5</sub>	270 mg/L
DQO	680 mg/L
SST	255 mg/L
Sólidos Sedimentables	2.5 mg/L
Nitrógeno Total	56 mg/L
Fósforo Total	10.39 mg/L
Grasas y Aceites	48 mg/L

### 3.8 Análisis e interpretación de datos

Se realizó un análisis de los datos obtenidos, determinando los parámetros operacionales de la PTAR y se compararon con los que determina la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 [13], así como TRMC, relación A/M, TRH, SSVLM, recirculación y purga de lodos. Además los parámetros de diseño de las unidades de tratamiento se equipararon con las consideraciones de diseño, como indica la siguiente Figura 17.



**Figura 17.- Seguimiento de evaluación de procesos de PTAR CETYS**

Los resultados de la evaluación se compararon considerando el consumo de reactivos químicos, energía eléctrica, así como la operación de los procesos unitarios.

### **3.9 Resultado del estudio y conclusiones**

Con los datos obtenidos en esta evaluación se presentan gráficas y tablas de comportamiento de las unidades de proceso de la PTAR CETYS, así como las conclusiones del análisis de dicha información.

## CAPÍTULO 4

### DESARROLLO PARA LA EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS UNITARIOS EN PTAR CETYS

#### 4.1 Desbaste grueso

Para la evaluación del desbaste grueso se tomaron las dimensiones de la malla que forma la rejilla que impide el paso de los sólidos mayores a ¾” de diámetro. Con los caudales registrados y con las dimensiones de la rejilla, se obtuvo la velocidad de paso a través de ella, así como la pérdida de carga al pasar por esta unidad utilizando la fórmula 1, recomendada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) [47] en rejillas utilizando mallas de acero inoxidable:

$$h_f = \left( \frac{1}{C^2 g} \right) \left( \frac{Q}{A} \right)^2 \quad (1)$$

Donde:

$h_f$  = pérdida de carga [m]

$C = 0.60$  = Coeficiente de descarga de la malla

$g = 9.81$  = Aceleración debida a la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

$Q$  = Caudal [m<sup>3</sup>/s]

$A$  = Área abierta efectiva de la malla sumergida [m<sup>2</sup>]

#### 4.2 Bombeo de agua residual

Se realizó la medición de la línea de descarga de agua cruda residual, así como la línea de impulsión que conduce el agua residual hasta el proceso siguiente que es el desarenador. En el trayecto de esta conducción se registraron, válvulas, codos, ampliaciones, material de la tubería y diámetro, así como la carga estática a vencer. Se utilizó la fórmula de Hazen Williams para el cálculo de pérdidas tanto en longitud de tuberías como en accesorios, con esta información se determinó la carga dinámica total a la que opera la bomba centrífuga y con los caudales registrados durante la

evaluación de este equipo de bombeo. El gasto de diseño de esta unidad fue de 7 L/s y su CDT fue de 11.14 m.

### **4.3 Desarenador**

Para la evaluación del desarenador de tipo vórtice, se determinó el tiempo de retención del agua en esta unidad de tratamiento. Para lograr esto, se tomaron las dimensiones del desarenador. Al registrar los caudales de evaluación, se determinó el volumen de agua cruda residual que tiene dicha unidad y dividiendo el volumen entre el caudal se determinó dicho tiempo de retención como lo indica la fórmula 2. El tiempo de retención mínimo de diseño fue 30 s.

### **4.4 Tamizado**

Se tomaron diferentes muestras de agua antes y después de pasar por el tamiz y en el laboratorio se realizó el análisis de la DBO<sub>5</sub>, SST y SSV. El valor de diseño del tamiz fue de 5 % mínimo de remoción de SST. Además, se verificó que la separación entre barras estuviera entre 2.3 a 6.4 mm.

### **4.5 Reactor biológico aerobio**

Al ser una de las unidades de tratamiento más importantes en la degradación de la materia orgánica del agua residual, se tomaron las dimensiones de la unidad y se realizaron muestreos por espacio de 7 meses. Se calculó el volumen de la unidad a diferentes flujos de operación. Con el muestreo del agua residual en diferentes puntos del reactor de junio a noviembre de 2015, se determinaron los SSV, DBO<sub>5</sub>, pH, temperatura y OD. Además, se realizaron aforos por desplazamiento de volumen para determinar el flujo de recirculación y purga de lodos. Con esta información se calculó el TMRC, TRH, la relación A/M, Co y Cs utilizando fórmulas recomendadas por el IMTA [47].

El TMRC se determinó en base a la fórmula 2:

$$TMRC = \left[ \frac{V_r X}{Q'_w X_r + Q_e X_e} \right] \quad (2)$$

Donde:

TMRC = Tiempo medio de retención celular [d]

$V_r$  = Volumen del reactor [L]

$X$  = Concentración de microorganismos en reactor biológico aerobio (SSVLM) [mg/L]

$Q'_w$  = Tasa de purga de células desde el caudal de recirculación [L/s]

$X_r$  = Concentración de microorganismos en la línea de recirculación de lodos [mg/L]

$Q_e$  = Caudal del líquido efluente de la unidad de separación [L/s]

$X_e$  = Concentración de microorganismos en efluente de la unidad de separación de sólidos [mg/L]

El TRH corresponde a la división del volumen de la unidad entre su caudal de operación, calculado con la fórmula 3:

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (3)$$

Donde:

$V$  = Volumen de la unidad [m<sup>3</sup>]

$Q$  = Caudal [m<sup>3</sup>/h]

La relación alimento microorganismo se obtuvo con la fórmula 4:

$$F / M = \frac{S_o}{TRH(X)} \quad (4)$$

Donde:

$X$  = Concentración de microorganismos en el reactor [mg/L]

$S_o$  = Concentración del sustrato en el afluente [mg/L]

$TRH$  = Tiempo de retención hidráulico [h]

La carga orgánica ( $C_o$ ) se obtuvo con la fórmula 5:

$$C_o = \left( \frac{DBO_5}{TRH} \right) (0.024) \quad (5)$$

Donde:

$C_o$  = carga orgánica [kgDBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>.d]

$DBO_5$  = En entrada a reactor biológico aerobio [mg/L].

$TRH$  = En reactor biológico aerobio [h]

#### 4.6 Sedimentación

Se determinó el TRH del sedimentador, previo dimensionamiento de la unidad. El valor de diseño fue de 2.60 a 4.00 h. La carga superficial se obtuvo de dividir el caudal de operación entre el área de la unidad, sus unidades están en m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d y su valor de diseño fue de 8.14 a 16.28 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d, el cual se determina con la fórmula 6:

$$C_s = \left( \frac{Q}{A} \right) 86.40 \quad (6)$$

Donde:

$C_s$  = Carga superficial [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d]

$Q$  = Caudal de ingreso [L/s]

$A$  = Área de la unidad [m<sup>2</sup>]

#### **4.7 Desinfección**

Con los caudales de evaluación registrados, se obtuvo el tiempo de contacto, se registró la medición de la unidad, ya que mínimo debe contar con un tiempo de contacto con cloro de 30 min para la inactivación de microorganismos patógenos. El tiempo de contacto se obtuvo de dividir el volumen de la unidad entre el caudal de operación como lo indica la fórmula 3. Además, se evaluó la dosis de cloro aplicada, cuyo valor de diseño fue de 8.0 mg/L.

#### **4.8 Filtración**

Se realizó la medición de la unidad de filtración. Con los caudales de operación, se calculó la tasa de filtración a la que operan los filtros y cuya unidad se establece en GPM/ft<sup>2</sup>. Esta tasa se obtuvo de dividir el flujo de operación entre el área del filtro utilizando la fórmula 6 y el valor de diseño fue de 5.7.

#### **4.9 Efluente**

Con base en los muestreos y los resultados del análisis de laboratorio de la calidad del agua residual tratada que se envía al campus de CETYS Universidad, se revisó el grado de cumplimiento de DBO<sub>5</sub>, SST y coliformes fecales que exige la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 [13] en materia de aguas para reúso en el sector público.

#### **4.10 Histórico de datos operativos PTAR CETYS**

La presente evaluación contempla los parámetros de cada proceso unitario durante el año 2015. Con el fin de presentar el estado que guarda la PTAR CETYS después de los resultados de la evaluación, se solicitó a CESPMM información histórica sobre DBO<sub>5</sub>, SST y coliformes fecales en el efluente de la PTAR. Se realizó trabajo de gabinete para obtener la información correspondiente al año 2016 y se presenta en el capítulo 5 de esta evaluación.

#### **4.11 Aplicación de mejoras**

Con la evaluación de cada proceso unitario y el histórico de datos operativos, se realizó una aplicación de mejoras con el fin de mantener la PTAR dentro de los parámetros operativos de diseño y realizar mediciones con dichos cambios entre los cuales fueron: bajar el caudal de ingreso, mayor recirculación de lodos e incremento de dosis de cloro. Esta mejora demostró que es posible colocar la PTAR en cumplimiento a los parámetros que indica la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 [13].

## **CAPÍTULO 5**

### **RESULTADOS**

#### **5.1 Desbaste grueso**

Se realizó la medición de la rejilla que elimina la basura que ingresa a la PTAR CETYS, los datos obtenidos aparecen en la Figura 18.

##### **5.1.1 Separación de barras**

Metcalf & Eddy [28] referente a este proceso, recomiendan que la remoción de contaminantes gruesos para protección de equipos debe estar en tres secciones denominadas como gruesa, media y fina. En cada sección la separación entre las barras que remueven basura, varía de 10 cm, 2.5 cm y 0.5 cm respectivamente.

Al evaluar este proceso, se encontró que la PTAR CETYS tiene como rejilla de desbaste grueso un canasto formado por malla de 1.905 cm de abertura y que recoge la basura como único elemento de remoción de sólidos gruesos. Dicho canasto, recoge los sólidos y mediante un izaje con una polea manual se extrae del fondo del cárcamo para retirar la basura; cuando este procedimiento ocurre, sólidos gruesos ingresan al sistema de bombeo que se muestra en la Figura 18, haciendo ineficiente la impulsión de agua residual al proceso siguiente. Después de este proceso no existe otra rejilla que remueva sólidos gruesos.

Se muestra en la Figura 18 que la rejilla en el cárcamo de bombeo se encuentra ubicada en un desnivel de 21 cm con respecto al vertedor de descarga de agua a la zona de bombeo.

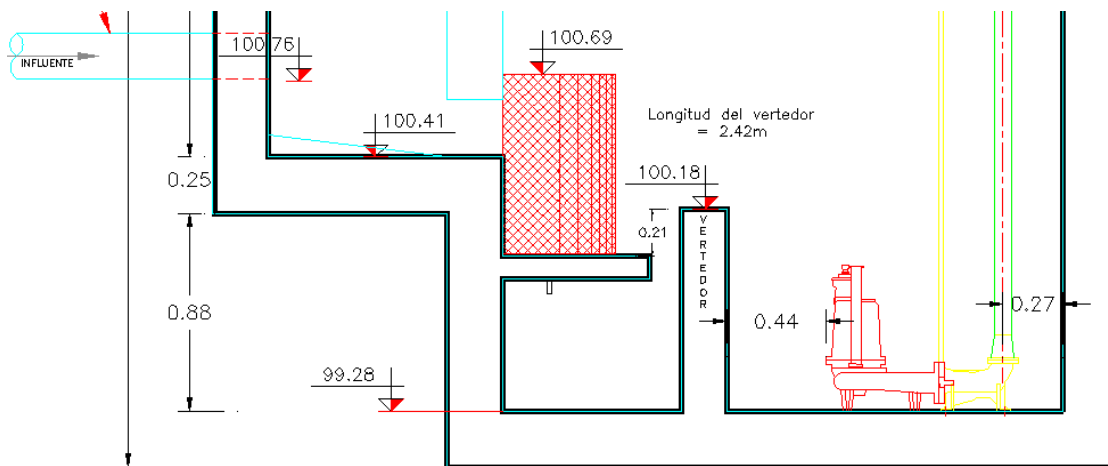


Figura 18. Ubicación de rejilla en cárcamo de bombeo de agua residual en PTAR CETYS

### 5.1.2 Pérdida de carga

La pérdida de carga a evaluar en este proceso se realizó mediante la fórmula 1. Con los datos obtenidos en las mediciones y aforos de caudal de la PTAR CETYS se determinó la pérdida de carga en la rejilla, los cuales se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Pérdida de carga en rejilla de la PTAR CETYS

Cálculo de velocidad de paso entre rejillas y pérdida de carga						
Q	L	H	Long. de rejilla	H <sub>1</sub> en rejilla	Vel. en rejilla	Pérdida de carga h <sub>r</sub>
L/s	m	m	m	m	m/s	m
10.70	2.42	0.0405	1.2854	0.2405	0.0496	0.00021
12.60	2.42	0.0451	1.2854	0.2451	0.0573	0.00028
12.85	2.42	0.0457	1.2854	0.2457	0.0583	0.00029
11.27	2.42	0.0419	1.2854	0.2419	0.0519	0.00023
11.71	2.42	0.0430	1.2854	0.2430	0.0537	0.00024
9.63	2.42	0.0377	1.2854	0.2377	0.0451	0.00017
6.48	2.42	0.0290	1.2854	0.2290	0.0315	0.00008
7.76	2.42	0.0327	1.2854	0.2327	0.0372	0.00012
5.04	2.42	0.0245	1.2854	0.2245	0.0250	0.00005
5.60	2.42	0.0263	1.2854	0.2263	0.0276	0.00006
6.76	2.42	0.0298	1.2854	0.2298	0.0328	0.00009
<b>Máximo</b>	<b>2.42</b>	<b>0.04570</b>	<b>1.28540</b>	<b>0.24570</b>	<b>0.05827</b>	<b>0.00029</b>
<b>Mínimo</b>	<b>2.42</b>	<b>0.02449</b>	<b>1.28540</b>	<b>0.22449</b>	<b>0.02501</b>	<b>0.00005</b>
<b>Promedio</b>	<b>2.42</b>	<b>0.03600</b>	<b>1.28540</b>	<b>0.23600</b>	<b>0.04272</b>	<b>0.00017</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00744</b>	<b>0.00000</b>	<b>0.00744</b>	<b>0.01171</b>	<b>0.00008</b>

Se observa que la rejilla de desbaste grueso se encuentra en una sola unidad. Las recomendaciones de diseño según el autor Metcalf & Eddy [28], de donde se obtuvieron las bases de diseño en la memoria de cálculo de la PTAR CETYS y que es el punto principal de evaluación de los procesos, indican que deben tener rejillas de desbaste de forma gradual para evitar taponamiento súbito en las rejillas, es decir de mayor a menor tamaño de abertura de las rejillas en el sentido del caudal. La pérdida de carga se encuentra dentro de los parámetros de diseño en virtud de que la composición de esta unidad se diseñó con malla, las cuales generan muy poca pérdida de carga comparada con las rejillas de barras paralelas, como lo indica la Tabla 12.

En la Figura 19 se observa que la pérdida de carga al caudal de diseño de 7 L/s es de 0.00010 m, lo cual para mallas limpias coincide con lo descrito por las bases de diseño, en donde se menciona que la pérdida de carga en mallas para aguas limpias es casi imperceptible. Esta pérdida es para aguas limpias, aunque cabe mencionar que la pérdida de carga real se gesta al paso del agua residual cruda, debido a que se remueven poco a poco los sólidos y cuando esto ocurre, se inicia el retiro de la malla para su limpieza en un proceso de monitoreo continuo.

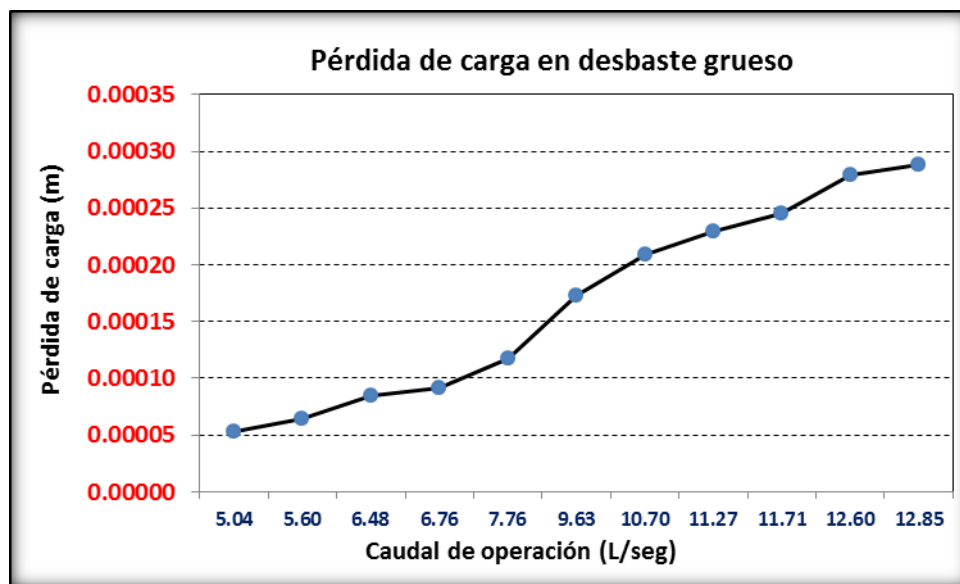


Figura 19. Pérdida de carga en desbaste grueso en la PTAR CETYS

## 5.2 Bombeo de agua residual

Con base a la revisión de la memoria de cálculo con la cual se diseñó la PTAR CETYS, se observa que se consideró una bomba sumergible para el bombeo del agua residual al proceso siguiente que es el desarenador. La bomba es marca Goulds Modelo 3888d3, impulsor WS3032D3, succión y descarga de 3 pulgadas de diámetro, motor de 3 HP a 1,750 R.P.M. Durante esta evaluación se tomaron las dimensiones y distancias de la línea de descarga de agua residual, así como de la tubería de impulsión, incluyendo los accesorios de conducción; tales como válvulas, codos, ampliaciones, así como cambio de material de tubería, los cuales se indican en la Tabla 13.

**Tabla 13. Datos de tubería de agua residual de afluente de la PTAR CETYS**

<b>Descarga de bomba</b>	<b>Valor</b>
Diámetro de tubería (d)	3 pulgadas
Material:	Acero
Longitud de tubería (L):	7.5964 m
Codos de 90°	3 piezas
Válvula de check tipo columpio	1 pieza
Válvula compuerta	1 pieza
Ampliación de 3" a 4"	1 pieza
<b>Línea de Impulsión</b>	
Diámetro de tubería (d)	4 pulgadas
En tubería de <b>Acero</b> :	
Longitud de tubería (L)	4.4 m
En tubería de <b>PVC</b>	
Longitud de tubería (L)	8 m
Codos de 90°	3 piezas
Codos de 45°	2 piezas
Carga estática de bombeo	9.92 m

### 5.2.1 Carga dinámica total (CDT) y gasto hidráulico (caudal)

Para las condiciones de operación del equipo de bombeo, se considera que la tubería permanecerá con caudal libre a todo lo largo de la conducción del agua residual hasta llegar al desarenador, sin regular el caudal con válvulas de seccionamiento.

Durante esta evaluación se obtuvieron los caudales registrados en la Tabla 14, los cuales fueron tomados del medidor de caudal electromagnético marca Endress + Hauser, tipo carrete de 4" de diámetro, modelo Proline Program Code 50W, observando que la línea de conducción no presentaba restricción del flujo por control de válvulas o algún otro dispositivo

**Tabla 14. Registro de caudales de ingreso de agua residual a PTAR CETYS**

<b>Fecha</b>	<b>Caudal de Ingreso (L/s)</b>
10-abr-15	10.70
01-jul-15	12.60
22-jul-15	12.85
07-ago-15	11.27
27-ago-15	11.71
10-sep-15	9.63
23-sep-15	6.48
06-oct-15	7.76
22-oct-15	5.04
10-nov-15	5.60
20-nov-15	6.76
<b>Máximo</b>	<b>12.850</b>
<b>Mínimo</b>	<b>5.040</b>
<b>Promedio</b>	<b>9.127</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>2.756</b>

En la Tabla 15 se muestran valores de variables y fórmulas aplicadas para el cálculo de la pérdida de carga total en la descarga de la bomba para el caudal de diseño de 7 L/s de la PTAR CETYS.

**Tabla 15. Pérdida de carga en descarga de bomba sumergible de la PTAR CETYS**

<b>Cálculo de pérdida de carga en descarga de bomba</b>	<b>Valor</b>
Caudal]	0.007 m <sup>3</sup> /s
Diámetro de tubería (d)	3 pulgadas
Área de tubería	0.00456 m <sup>2</sup>
Velocidad	1.535 m/s
Pérdida de carga por Hazen Williams	
Fórmula para pérdidas longitudinales	
$H_{F1} = \left[ \frac{Q}{(0.2788)(C)d^{2.63}} \right]^{(1/0.54)} L$	
Material	Acero
Longitud de tubería (L)	7.5964 m
Coefficiente de rugosidad [C]	125 m
H <sub>F1</sub>	0.30159
Fórmula para pérdidas en accesorios	
$H_{acc} = \frac{KV^2}{2g}$	
Codos de 90°	3 piezas
K <sub>CODO 90°</sub>	1.13
Válvula de check tipo columpio	1 pieza
K <sub>CHECK</sub>	1.6
Válvula compuerta	1 pieza
K <sub>VÁLVULA COMPUERTA</sub>	0.12
Ampliación de 3" a 4"	1 pieza
K <sub>AMPL 3" A 4"</sub>	0.2147
Suma de K	5.3247
H <sub>acc total</sub>	0.6394 m
Pérdida de carga total en descarga	<b>0.941 m</b>

En la Tabla 16 se observan valores de variables y fórmulas aplicadas para el cálculo de la pérdida de carga en la línea de impulsión para el caudal de diseño de 7 L/s de la PTAR.

**Tabla 16. Pérdida de carga en línea de impulsión de la PTAR CETYS**

<b>Cálculo de pérdida de carga en línea de impulsión</b>	<b>Valor</b>
Caudal (Q)	0.007 m³/s
Diámetro de tubería (d)	4 pulgadas
Área de tubería	0.008107 m²
Velocidad	0.863 m/s
En tubería de <b>Acero</b> :	
Pérdida de carga por Hazen Williams	
Fórmula para pérdidas Longitudinales	
$H_{F1} = \left[ \frac{Q}{(0.2788)(C)d^{2.63}} \right]^{(1/0.54)} L$	
Material:	Acero
Longitud de tubería (L)	4.4 m
Coefficiente de rugosidad [C]	125
H <sub>F1</sub>	<b>0.043 m</b>
En tubería de <b>PVC</b> :	
Pérdida de carga por Hazen Williams	
Fórmula para pérdidas Longitudinales	
$H_{F2} = \left[ \frac{Q}{(0.2788)(C)d^{2.63}} \right]^{(1/0.54)} L$	
Material:	PVC
Diámetro interno (d)	0.0961 m
Velocidad (V)	0.9651 m/s
Longitud de tubería (L)	8 m
Coefficiente de rugosidad [C]	150
H <sub>F2</sub>	<b>0.073 m</b>
Fórmula para pérdidas en accesorios	
$H_{acc} = \frac{KV^2}{2g}$	
Codos de 90°	3 piezas
K <sub>CODO 90°</sub>	1.13
Codos de 45°	2 piezas
K <sub>CODO 90°</sub>	0.24
Suma de K	3.87
H <sub>acc total</sub>	0.1837 m
Pérdida de carga total en descarga	<b>0.300 m</b>

En la Tabla 17 se indica la CDT que debe vencer la bomba para poder suministrar el flujo de diseño.

**Tabla 17. CDT a caudal de diseño de la PTAR CETYS**

Suma de pérdida en descarga y línea de impulsión	Valor
Pérdidas totales en el sistema (HI)	1.241 m
Carga estática de bombeo	9.92 m
CDT de bombeo	11.161 m
CDT de bombeo	<b>36.62 pies</b>
Caudal de diseño de la bomba	0.007 m <sup>3</sup> /s
Caudal de diseño de la bomba	<b>111.0 GPM</b>

Bajo esta misma metodología, se procedió a determinar la CDT a la que está operando la bomba con los caudales registrados durante esta evaluación (indicados en la Tabla 14), y cuyo valor caudal-CDT se resumen en la Tabla 18.

Este comparativo de caudal-CDT; nos permite conocer el comportamiento del equipo de bombeo bajo las condiciones actuales de operación y compararlas con el desempeño esperado en la curva de operación otorgada por el fabricante para la misma bomba.

**Tabla 18. CDT a diferentes caudales de operación de la PTAR CETYS**

<b>Caudal (L/s)</b>	7.000	10.700	12.600	12.850	11.270	11.710	9.630	6.480	7.760	5.040	5.600	6.760
<b>CDT (Pies)</b>	36.617	41.864	45.367	45.868	42.857	43.658	40.132	36.048	37.524	34.692	35.181	36.350

La gráfica de la Figura 20, nos muestra que al caudal de diseño de 7 L/s de la PTAR CETYS se tiene una CDT de 11.16 m (36.617 pies) con la descarga libre en la tubería de impulsión; sin embargo, durante esta evaluación se observó que la bomba actual que se encuentra en operación impulsa más agua residual que los 7 L/s que requieren, motivo por el cual se cierra parcialmente una válvula en una línea de retorno para controlar el flujo requerido de tratamiento.

Con esta acción se encontró que la bomba diseñada para esa carga dinámica y caudal, no es la que actualmente opera en la PTAR. En entrevista con personal de operación de la planta nos informaron que esa bomba desde que se suministró con toda la planta en funcionamiento, se entregó con más caballos de potencia y que así se le recibió en obra terminada al contratista de la edificación de la PTAR desde el 2008. En virtud de que la bomba suministra más flujo que el requerido, por ser de mayor potencia y capacidad, al “estrangular” la descarga se está perdiendo energía en esa operación, lo que conduce en costos altos de consumo de energía eléctrica sin el aprovechamiento en el tratamiento del agua, dado que parte del caudal una vez bombeado regresa al cárcamo de bombeo nuevamente por una línea de recirculación.

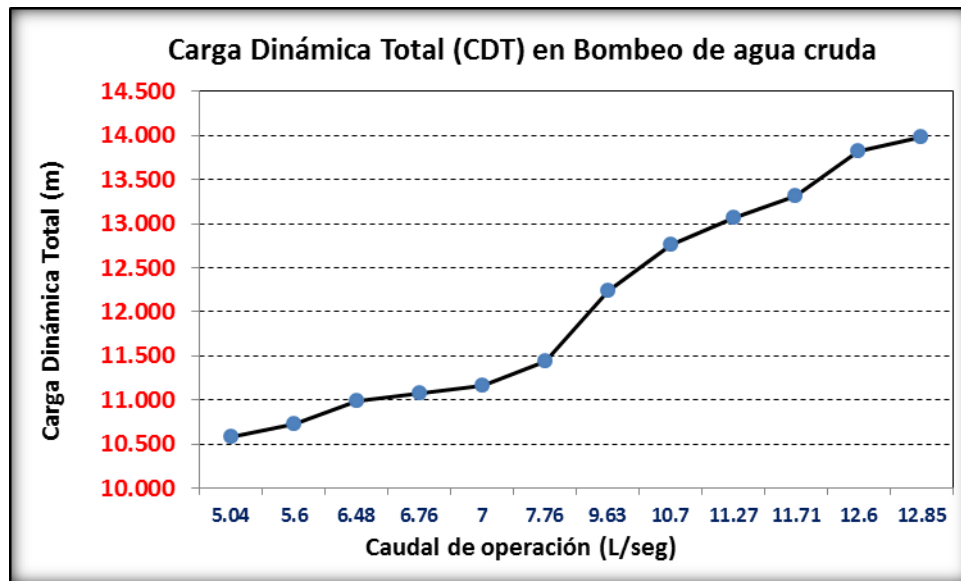


Figura 20. CDT en bombeo de agua cruda en la PTAR CETYS

### 5.3 Desarenador

Se registraron las características del desarenador, formado por un equipo marca West Tech de 48” de diámetro exterior y 1.72 m de altura, con 13” de diámetro del tubo interior y 1.21 m de ancho en la salida a la criba, mostrado en la Figura 21.



**Figura 21. Vista de desarenador tipo vórtice de la PTAR CETYS**

Para verificar la eficiencia del desarenador y utilizando la fórmula 3, se determinó el tiempo de retención en segundos a los diferentes flujos de operación registrados en la Tabla 14. Los resultados se muestran en la Tabla 19.

**Tabla 19. Tiempo de retención en desarenador a diferentes caudales de operación de la PTAR CETYS**

<b>Caudal (L/s)</b>	<b>Volumen (L)</b>	<b>Tiempo de retención (s)</b>
10.70	1,488.51	139.11
12.60	1,492.32	118.44
12.85	1,492.81	116.17
11.27	1,489.68	132.18
11.71	1,490.56	127.29
9.63	1,486.27	154.34
6.48	1,479.11	228.26
7.76	1,482.13	191.00
5.04	1,475.46	292.75
5.60	1,476.92	263.73
6.76	1,479.79	218.90
<b>Máximo</b>	<b>1,492.81</b>	<b>292.75</b>
<b>Mínimo</b>	<b>1,475.46</b>	<b>116.17</b>
<b>Promedio</b>	<b>1,484.87</b>	<b>180.20</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>6.09</b>	<b>59.50</b>

La Figura 22 indica que aún para caudales mayores a 7 L/s el desarenador tiene la capacidad de remover arenas, debido a los tiempos de retención mayores a los indicados de diseño.

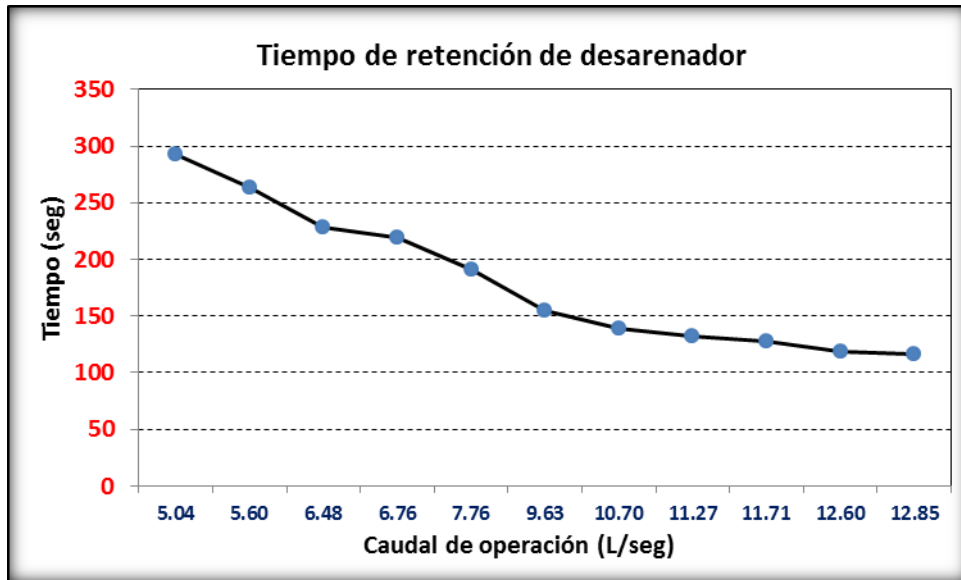


Figura 22. TRH en desarenador tipo vórtice de la PTAR CETYS

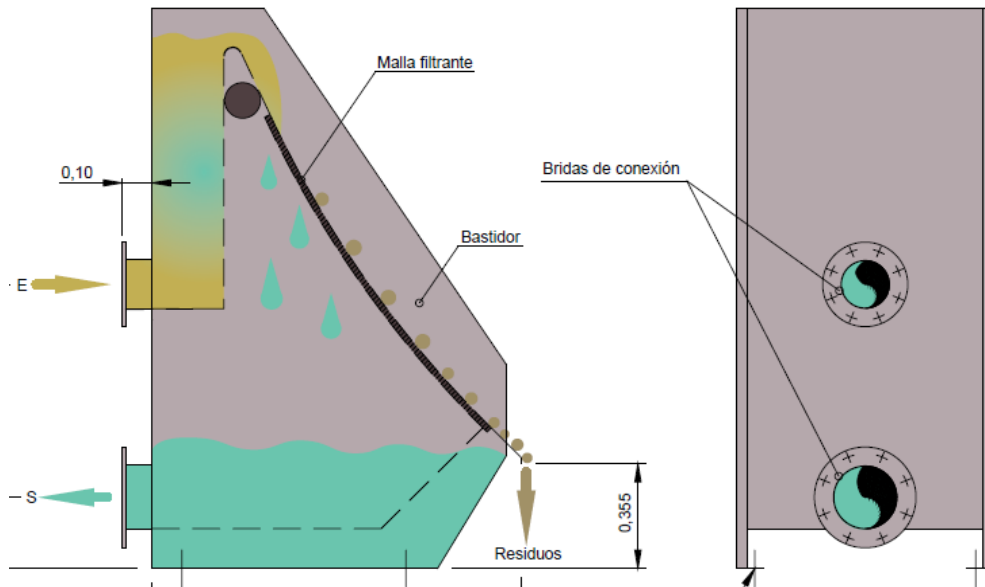
#### 5.4 Tamizado

Se tomaron las dimensiones del tamiz el cual tiene 1.32 m por 1.219 m y con barras de 2 mm de espesor y separadas a cada 1.50 mm. La Figura 23 muestra el tamiz estático de la PTAR CETYS.



Figura 23. Vista del tamiz de la PTAR CETYS

La Figura 24 muestra el esquema de funcionamiento de un tamiz estático.



**Figura 24. Esquema de funcionamiento de tamiz estático**

La Tabla 20 muestra los valores obtenidos de DBO<sub>5</sub>, en el afluente y efluente del tamiz con los cuales se calculó el porcentaje de remoción correspondiente.

**Tabla 20. Resultados de DBO<sub>5</sub> en tamiz de la PTAR CETYS**

Fecha	DBO <sub>5</sub>		
	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	% Remoción
27-ago-15	208.50	192.50	7.67
10-sep-15	132.00	111.50	15.53
23-sep-15	142.00	137.00	3.52
06-oct-15	152.50	142.50	6.56
22-oct-15	183.00	128.33	29.87
<b>Máximo</b>	<b>208.500</b>	<b>192.500</b>	<b>29.874</b>
<b>Mínimo</b>	<b>132.000</b>	<b>111.500</b>	<b>3.521</b>
<b>Promedio</b>	<b>163.600</b>	<b>142.366</b>	<b>12.631</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>28.216</b>	<b>27.173</b>	<b>9.489</b>

En la Tabla 21 se observan los valores obtenidos de SST tanto en el afluente como el efluente del tamiz y el porcentaje de remoción calculado.

**Tabla 21. Resultados de SST en tamiz de la PTAR CETYS**

Fecha	SST		
	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	% Remoción
27-ago-15	130.00	113.33	12.82
10-sep-15	106.67	103.33	3.13
23-sep-15	113.00	106.67	5.60
06-oct-15	113.33	100.00	11.76
22-oct-15	140.00	113.33	19.05
<b>Máximo</b>	<b>140.000</b>	<b>113.33</b>	<b>19.050</b>
<b>Mínimo</b>	<b>106.670</b>	<b>100.000</b>	<b>3.130</b>
<b>Promedio</b>	<b>120.60</b>	<b>107.332</b>	<b>10.472</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>12.405</b>	<b>5.332</b>	<b>5.628</b>

En la Tabla 22 se aprecian los valores obtenidos de SSV en afluente y efluente del tamiz y su respectivo porcentaje de remoción.

**Tabla 22. Resultados de SSV en tamiz de la PTAR CETYS**

Fecha	SSV		
	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	% Remoción
27-ago15	80.00	70.00	12.50
10-sep-15	60.00	60.00	0.00
23-sep-15	76.67	70.00	8.70
06-oct-15	73.33	60.00	18.18
22-oct-15	83.33	73.33	12.00
<b>Máximo</b>	<b>83.330</b>	<b>73.330</b>	<b>18.178</b>
<b>Mínimo</b>	<b>60.000</b>	<b>60.000</b>	<b>0.000</b>
<b>Promedio</b>	<b>74.666</b>	<b>66.666</b>	<b>10.276</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>8.055</b>	<b>5.577</b>	<b>5.974</b>

De acuerdo con los resultados correspondientes al periodo que se evaluó el tamiz, se logró remover en promedio un 12.63 % de DBO<sub>5</sub>, un 10.47 % de SST y un 10.27 % de SSV. Las bases de diseño indican un tamizado efectivo si por lo menos elimina el 5 % de los SST [45].

Este tamiz se encuentra operando de forma aceptable. Sin embargo, en una revisión de su capacidad de tratamiento y debido a las dimensiones que tiene, se observó que puede aceptar un caudal de hasta 75 m<sup>3</sup>/h (20.8 L/s), bajo esta condición se establece que la unidad tiene capacidad de tratamiento de hasta el 297 %, ya que la PTAR fue diseñada para 7 L/s.

## 5.5 Reactor biológico aerobio

### 5.5.1 Parámetros medidos en el reactor: pH, temperatura, OD, caudal y TRH

En el reactor (Figura 25) se midió el pH, temperatura y OD por 84 días durante el periodo de junio a noviembre del 2015. Con esta información y con el volumen en el reactor se calculó el TRH. Cabe mencionar que, durante esta evaluación, el reactor siempre estuvo operando con un solo soplador, que suministra el oxígeno necesario a los microorganismos para su desarrollo, reproducción y como consecuencia la degradación de la materia orgánica a través de los mismos. El reactor biológico aerobio tiene un área de 105.49 m<sup>2</sup> y una altura promedio de 4.5 m.



**Figura 25. Reactor biológico aerobio de la PTAR CETYS**

En las Tablas 23 y 24 se observan los valores de pH, temperatura y OD medidos en el reactor biológico aerobio de la PTAR CETYS correspondientes a los meses de junio y julio de 2015. También se muestra el caudal, el TRH calculado y los promedios de cada parámetro.

**Tabla 23. Parámetros medidos en el reactor de la PTAR CETYS en junio de 2015**

Junio 2015					
Día	pH	Temperatura (°C)	OD (mg/L)	Caudal (L/s)	TRH (h)
23	7.77	31.40	0.89	10.27	13.12
24	7.82	31.40	0.20	11.01	12.24
25	7.87	31.50	0.91	9.65	13.97
28	7.82	31.60	0.80	10.56	12.76
29	7.86	31.80	1.52	11.20	12.03
30	7.78	31.70	1.54	12.60	10.70
<b>Máximo</b>	<b>7.870</b>	<b>31.800</b>	<b>1.540</b>	<b>12.600</b>	<b>13.968</b>
<b>Mínimo</b>	<b>7.770</b>	<b>31.400</b>	<b>0.200</b>	<b>9.650</b>	<b>10.698</b>
<b>Promedio</b>	<b>7.820</b>	<b>31.567</b>	<b>0.977</b>	<b>10.882</b>	<b>12.472</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>0.037</b>	<b>0.149</b>	<b>0.458</b>	<b>0.919</b>	<b>1.012</b>

**Tabla 24. Parámetros medidos en el reactor de la PTAR CETYS en julio de 2015**

Julio 2015					
Día	pH	Temperatura (°C)	OD (mg/L)	Caudal (L/s)	TRH (h)
1	7.86	33.77	0.46	10.73	12.56
2	7.87	34.89	0.23	10.62	12.69
6	7.90	34.18	0.63	12.70	10.61
7	7.90	32.89	0.65	10.71	12.59
8	7.85	33.38	0.41	10.95	12.31
12	7.84	33.49	0.19	11.60	11.62
13	7.86	33.52	0.15	12.34	10.92
19	7.81	32.02	1.73	12.40	10.87
20	7.94	33.26	2.58	12.83	10.51
22	8.02	33.09	0.79	13.88	9.71
23	8.06	33.33	1.05	11.52	11.70
26	8.02	34.10	0.31	11.34	11.89
27	8.02	33.86	0.22	10.15	13.28
28	8.00	32.81	0.22	10.04	13.43
29	7.87	34.78	0.15	100.30	1.34
30	7.95	35.22	0.15	10.15	13.28
<b>Máximo</b>	<b>8.060</b>	<b>35.220</b>	<b>2.580</b>	<b>100.300</b>	<b>13.425</b>
<b>Mínimo</b>	<b>7.810</b>	<b>32.020</b>	<b>0.150</b>	<b>10.040</b>	<b>1.344</b>
<b>Promedio</b>	<b>7.923</b>	<b>33.662</b>	<b>0.620</b>	<b>17.016</b>	<b>11.207</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>0.076</b>	<b>0.808</b>	<b>0.651</b>	<b>21.531</b>	<b>2.763</b>

En la Tabla 25 se observan los valores de pH, temperatura y OD medidos en el reactor biológico aerobio de la PTAR CETYS en agosto de 2015. También se muestra el caudal, el TRH calculado y los promedios de cada parámetro.

**Tabla 25. Parámetros medidos en el reactor de la PTAR CETYS en agosto de 2015**

Agosto 2015					
Día	pH	Temperatura (°C)	OD mg/L)	Caudal (L/s)	TRH (h)
2	7.96	34.74	0.13	9.65	13.97
3	7.95	35.06	0.16	10.66	12.64
4	8.02	34.48	1.47	10.92	12.34
5	8.03	35.78	0.26	11.58	11.64
6	8.05	33.70	2.10	11.27	11.96
16	8.03	34.34	0.13	11.83	11.39
17	8.11	35.26	1.68	11.96	11.27
18	8.15	35.09	0.17	11.82	11.40
24	8.07	33.50	0.11	7.41	18.19
25	8.18	34.93	0.09	11.27	11.96
26	8.22	36.38	0.09	11.71	11.51
27	8.16	37.26	0.08	12.14	11.10
30	8.12	39.33	0.30	10.31	13.07
31	8.13	35.09	0.20	10.28	13.11
<b>Máximo</b>	<b>8.220</b>	<b>39.330</b>	<b>2.100</b>	<b>12.140</b>	<b>18.191</b>
<b>Mínimo</b>	<b>7.950</b>	<b>33.500</b>	<b>0.080</b>	<b>7.410</b>	<b>11.103</b>
<b>Promedio</b>	<b>8.084</b>	<b>35.353</b>	<b>0.498</b>	<b>10.915</b>	<b>12.541</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>8.094</b>	<b>35.400</b>	<b>0.526</b>	<b>11.012</b>	<b>12.431</b>

La Tabla 26 muestra los valores de pH, temperatura y OD medidos en el reactor biológico aerobio de la PTAR CETYS en septiembre de 2015. También se muestra el caudal, el TRH calculado y los promedios de cada parámetro.

Tabla 26. Parámetros medidos en el reactor de la PTAR CETYS en septiembre de 2015

Septiembre 2015					
Día	pH	Temperatura (°C)	OD (mg/L)	Caudal (L/s)	TRH (h)
1	8.15	37.24	0.29	10.10	13.35
2	8.13	35.97	0.11	9.98	13.51
3	8.17	36.79	0.11	10.01	13.47
6	8.06	37.03	0.11	9.78	13.78
7	7.33	35.40	0.12	10.48	12.86
8	7.21	33.73	1.04	7.79	17.30
9	7.48	32.03	1.23	9.63	14.00
10	7.39	36.22	0.27	9.56	14.10
13	7.68	34.63	0.24	9.90	13.62
16	7.62	33.47	1.62	7.62	17.69
17	7.61	34.05	0.74	7.61	17.71
20	7.64	30.29	1.69	4.93	27.34
21	7.71	30.59	2.39	5.00	26.96
22	7.82	33.60	1.31	6.48	20.80
23	7.65	34.55	1.25	5.19	25.97
24	7.68	33.38	0.74	5.05	26.69
27	7.71	34.40	1.33	7.74	17.41
28	7.59	33.99	1.73	7.54	17.88
29	7.75	33.47	1.27	5.21	25.87
30	7.68	33.15	1.20	5.75	23.44
<b>Máximo</b>	<b>8.170</b>	<b>37.240</b>	<b>2.390</b>	<b>10.480</b>	<b>27.341</b>
<b>Mínimo</b>	<b>7.210</b>	<b>30.290</b>	<b>0.110</b>	<b>4.930</b>	<b>12.862</b>
<b>Promedio</b>	<b>7.703</b>	<b>34.199</b>	<b>0.940</b>	<b>7.768</b>	<b>18.687</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>0.256</b>	<b>1.864</b>	<b>0.655</b>	<b>2.001</b>	<b>5.266</b>

En las Tablas 27 y 28 se muestran los valores de pH, temperatura y OD medidos en el reactor biológico aerobio de la PTAR CETYS durante los meses respectivos de octubre y noviembre de 2015. También se observa el caudal, el TRH calculado y los promedios de cada parámetro.

**Tabla 27. Parámetros medidos en el reactor de la PTAR CETYS en octubre de 2015**

<b>Octubre 2015</b>					
<b>Día</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>OD (mg/L)</b>	<b>Caudal (L/s)</b>	<b>TRH (h)</b>
1	7.22	32.60	0.33	5.01	26.90
4	7.83	30.54	0.70	7.13	18.90
5	7.76	27.61	2.49	7.76	17.37
6	7.66	31.73	1.41	7.66	17.60
7	7.66	31.98	1.61	5.55	24.29
8	7.70	33.27	1.86	7.88	17.11
11	7.73	31.70	1.14	5.99	22.50
12	7.71	34.50	0.18	5.04	26.74
13	7.66	34.58	0.12	6.46	20.87
14	7.70	33.04	1.75	4.96	27.18
15	7.71	33.30	0.70	9.23	14.60
18	7.74	28.80	3.83	5.55	24.29
19	7.70	33.15	1.20	5.74	23.48
20	7.75	30.54	0.70	5.24	25.72
21	7.78	28.80	0.70	4.30	31.35
26	7.83	31.32	1.01	5.78	23.32
29	7.86	28.91	2.62	5.05	26.69
<b>Máximo</b>	<b>7.860</b>	<b>34.580</b>	<b>3.830</b>	<b>9.230</b>	<b>31.347</b>
<b>Mínimo</b>	<b>7.220</b>	<b>27.610</b>	<b>0.120</b>	<b>4.300</b>	<b>14.604</b>
<b>Promedio</b>	<b>7.706</b>	<b>31.551</b>	<b>1.315</b>	<b>6.137</b>	<b>22.877</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>0.135</b>	<b>2.025</b>	<b>0.950</b>	<b>1.303</b>	<b>4.396</b>

**Tabla 28. Parámetros medidos en el reactor de la PTAR CETYS en noviembre de 2015**

<b>Noviembre 2015</b>					
<b>Día</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>OD (mg/L)</b>	<b>Caudal (L/s)</b>	<b>TRH (h)</b>
2	7.88	26.29	2.81	5.39	25.01
4	7.81	28.60	1.75	5.19	25.97
8	7.71	30.59	2.39	5.00	26.96
9	7.82	33.04	1.75	5.31	25.38
11	7.81	28.46	1.85	5.89	22.88
15	7.68	26.57	0.28	5.35	25.19
16	7.74	26.16	1.71	5.40	24.96
17	7.83	25.78	0.18	6.67	20.21
18	7.67	26.29	0.20	5.65	23.86
22	7.87	25.59	0.22	7.88	17.11
29	7.93	23.07	0.22	7.93	17.00
<b>Máximo</b>	<b>7.930</b>	<b>33.040</b>	<b>2.810</b>	<b>7.930</b>	<b>26.958</b>
<b>Mínimo</b>	<b>7.670</b>	<b>23.070</b>	<b>0.180</b>	<b>5.000</b>	<b>16.998</b>
<b>Promedio</b>	<b>7.795</b>	<b>27.313</b>	<b>1.215</b>	<b>5.969</b>	<b>23.139</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>0.080</b>	<b>2.695</b>	<b>0.854</b>	<b>1.037</b>	<b>3.437</b>

## 5.5.2 TMRC y relación A/M en reactor biológico de la PTAR CETYS

Para la determinar el TMRC y la relación A/M en el reactor fue necesario contar con las mediciones del reactor y los caudales, además con los resultados de DBO<sub>5</sub>, SSVLM y SSV de las muestras analizadas en el laboratorio. La Tabla 29 muestra los resultados de campo y de análisis de laboratorio.

**Tabla 29. Resultados de DBO<sub>5</sub>, SSV y caudales para determinación de TMRC y relación A/M**

Fecha	DBO <sub>5</sub>	SSVLM en Reactor Biológico	SSV en Recirculación	SSV en efluente Sedimentador	Caudal Afluente	Caudal Recirculación	Volumen Reactor Biológico	Caudal de Efluente PTAR	Caudal de purga
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(L/s)	(L/s)	(m <sup>3</sup> )	(L/s)	(L/s)
10-abr-15	243.67	600.00	865	N.A.	10.70	3.90	485.98	N.R.	0.92
01-jul-15	157.00	650.00	870	50.00	12.60	3.90	492.90	4.49	0.92
22-jul-15	218.00	315.00	500	4.00	12.85	3.90	493.81	3.59	0.92
07-ago-15	250.00	400.00	322	44.00	11.27	3.90	488.06	6.38	0.92
27-ago-15	203.00	292.00	1640	10.00	11.71	3.90	489.66	6.32	0.92
10-sep-15	122.00	275.00	640	26.00	9.63	3.90	482.08	6.19	0.92
23-sep-15	132.00	330.00	1860	N.A.	6.48	3.90	470.60	N.R.	0.92
06-oct-15	213.00	595.00	1350	10.00	7.76	3.90	475.27	4.21	0.92
22-oct-15	182.50	373.30	930	10.00	5.04	3.90	465.27	3.80	0.92
10-nov-15	155.60	810.00	2980	N.A.	5.60	3.90	468.15	N.R.	0.92
20-nov-15	223.00	1,600.00	3320	N.A.	6.76	3.90	472.50	N.R.	0.92
<b>Máximo</b>	<b>250.00</b>	<b>1,600.00</b>	<b>3320</b>	<b>50.00</b>	<b>12.85</b>	<b>3.90</b>	<b>493.81</b>	<b>6.38</b>	<b>0.92</b>
<b>Mínimo</b>	<b>122.00</b>	<b>275.00</b>	<b>322</b>	<b>4.00</b>	<b>5.04</b>	<b>3.90</b>	<b>465.27</b>	<b>3.59</b>	<b>0.92</b>
<b>Promedio</b>	<b>190.89</b>	<b>567.30</b>	<b>1388.8</b>	<b>22.00</b>	<b>9.13</b>	<b>3.90</b>	<b>480.39</b>	<b>5.00</b>	<b>0.92</b>
<b>Desv. Estd.</b>	<b>41.95</b>	<b>366.91</b>	<b>943.44</b>	<b>17.07</b>	<b>2.76</b>	<b>0.00</b>	<b>9.90</b>	<b>1.16</b>	<b>0.00</b>

N.A.: No analizado N.R.: No registrado

Así mismo, se aforó el caudal de purga de lodos para obtener el TMRC con la fórmula 2 y la relación A/M obtenida con la fórmula 4, los resultados se registran en la Tabla 30, además se muestran los valores de DBO<sub>5</sub> en afluente y efluente con su respectivos porcentajes de remoción.

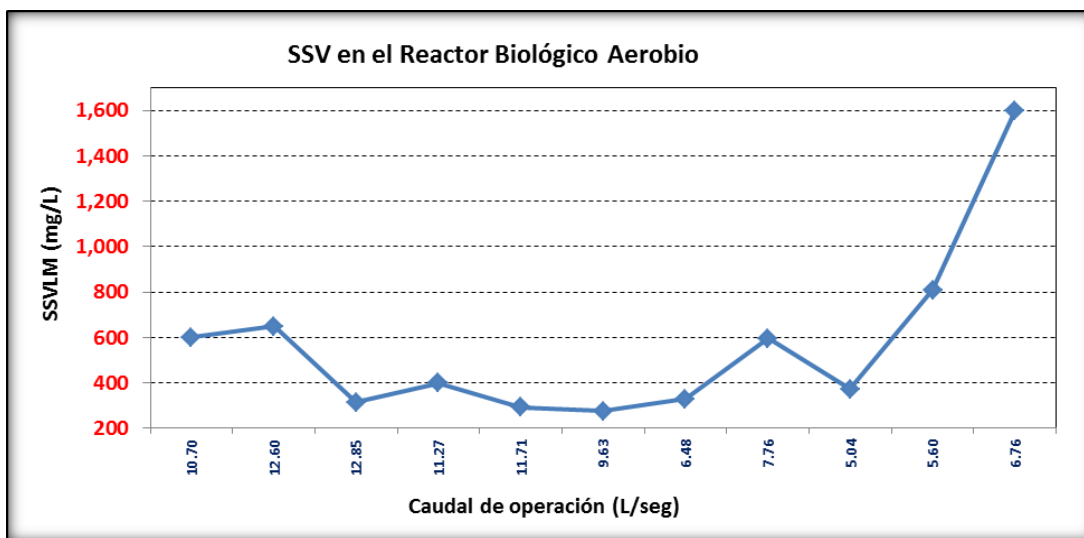
**Tabla 30. Resultados de TMRC, relación A/M, DBO<sub>5</sub> y rendimiento del proceso de la PTAR CETYS**

Fecha	TMRC	Relación A/M	DBO <sub>5</sub> Afluente PTAR	DBO <sub>5</sub> Efluente PTAR	Rendimiento del proceso
	Días	mg DBO <sub>5</sub> /mg SSVLM.d	(mg/L)	(mg/L)	% de DBO <sub>5</sub> removida
10-abr-15	2.63	0.77	243.67	5.40	97.78
01-jul-15	2.68	0.53	157.00	3.55	97.74
22-jul-15	3.55	1.56	218.00	12.20	94.40
07-ago-15	3.01	1.25	250.00	10.00	96.00
27-ago-15	1.02	1.44	203.00	35.60	82.46
10-sep-15	1.88	0.77	122.00	4.05	96.68
23-sep-15	0.97	0.48	132.00	4.07	96.92
06-oct-15	2.50	0.51	213.00	3.05	98.57
22-oct-15	2.24	0.46	182.50	12.20	93.32
10-nov-15	1.47	0.20	155.60	10.20	93.44
20-nov-15	2.61	0.17	223.00	7.10	96.82
<b>Máximo</b>	<b>3.55</b>	<b>1.56</b>	<b>250.00</b>	<b>35.60</b>	<b>98.57</b>
<b>Mínimo</b>	<b>0.97</b>	<b>0.17</b>	<b>122.00</b>	<b>3.05</b>	<b>82.46</b>
<b>Promedio</b>	<b>2.23</b>	<b>0.74</b>	<b>190.89</b>	<b>9.77</b>	<b>94.92</b>
<b>Desv. Estd.</b>	<b>0.78</b>	<b>0.45</b>	<b>41.95</b>	<b>8.81</b>	<b>4.28</b>

### 5.5.3 Carga orgánica (Co)

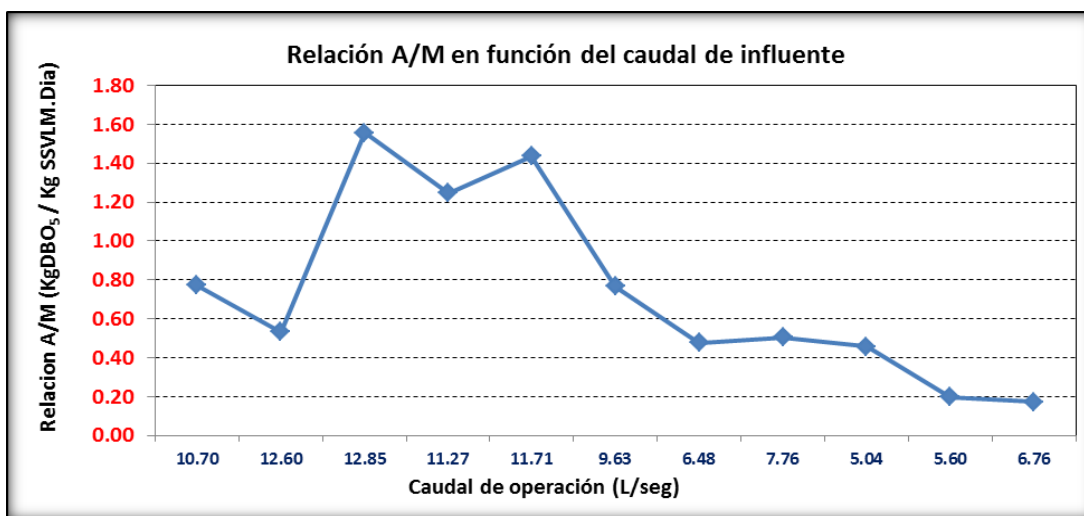
Con el valor promedio de la DBO<sub>5</sub> de 142.36 mg/L a la entrada a reactor biológico y el TRH de 17.22 h que se obtuvo de promediar los valores de TRH de los meses de junio a noviembre, sustituidos en la fórmula 4, la Co del reactor da un valor de 0.20 kgDBO<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>.d

Como puede observarse en la Figura 26, se incrementan los SSVLM, los cuales deben estar en el orden de 3,800 mg/L; que, durante esta evaluación, aún no se llegó a este valor.



**Figura 26. SSV en el reactor en función del caudal de la PTAR CETYS**

Como se puede ver en la Figura 27 los valores de relación A/M tiende a disminuir en la medida en que disminuye el flujo y también a medida que aumentan los SSVLM.



**Figura 27. La relación A/M en función de caudal de la PTAR CETYS**

Con base a los resultados de la evaluación de los procesos, en agosto de 2015, se convocó a una reunión con personal de operación y directivos de CESPM.

Se les realizó una presentación sobre los avances de investigación de esta evaluación y se les solicitó autorización para realizar los cambios operativos en la PTAR.

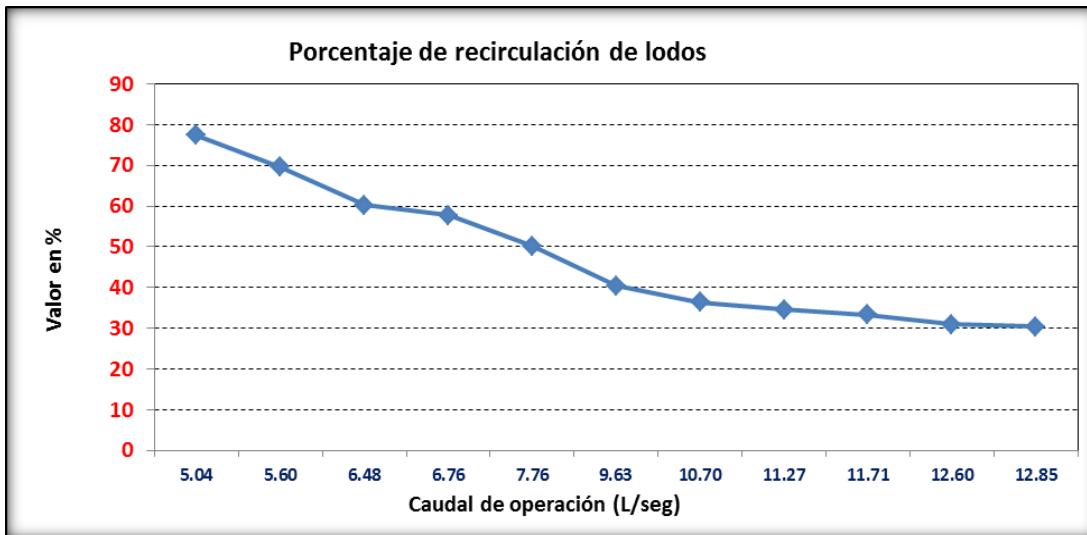
Ya que esta investigación tiene como objetivos específicos hacer ajustes en la operación e implantar mejores prácticas operativas, dimos cumplimiento a estos objetivos implantando estas acciones:

#### 1. Disminuir el caudal de entrada en la PTAR CETYS

Esta acción tuvo como soporte el hecho de que las instalaciones del campus CETYS no requieren de un caudal mayor a 7 L/s. El sustento de esta acción se basa en la toma de lecturas del efluente comparado con el afluente de la PTAR. Se realizó una lectura en campo de los totalizadores en metros cúbicos que registran ambos medidores de caudal y se concluyó que el restante del caudal que requiere el campus estaba siendo desalojado por el vertedor de demasías del tanque de cámara de contacto de cloro. El personal de operación mantiene un caudal alto en el afluente de la planta, argumentando que la bomba de agua cruda que impulsa el agua al desarenador había sido suministrada desde el inicio de operación de la planta con una capacidad mayor a la de diseño, el cual suministraba un caudal de hasta 11.5 L/s. Además, otro argumento citado por personal de operación; era mantener un volumen mayor de agua en el reactor biológico para conservar una cantidad mayor de microorganismos y depurar con mayor eficiencia el agua residual; sin considerar que, para ello, deben cuidarse los TMRC, TRH y relación A/M, además del porcentaje de recirculación de lodos; y, al no tener en cuenta esos factores la PTAR estaba operando de forma deficiente.

#### 2. Mejores prácticas operativas

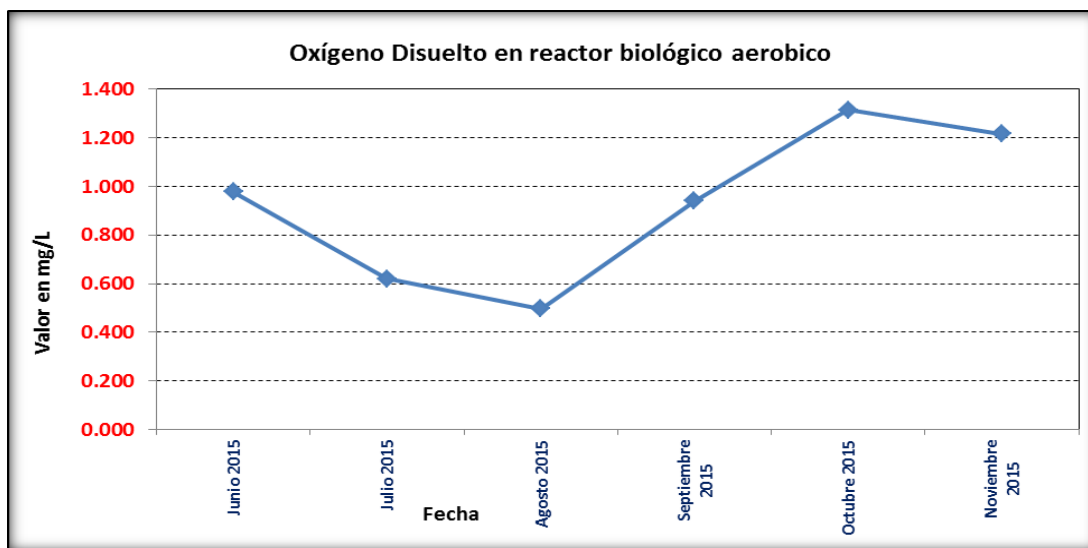
Se incrementó el porcentaje de recirculación de lodos en el reactor. El operador de PTAR CETYS disminuyó el caudal de ingreso a la planta y mantuvo el caudal de recirculación de lodos. Con esta acción, se incrementó el porcentaje de recirculación de lodos, dado que el caudal de lodos de recirculación ahora se dividía en menos caudal de ingreso. En la Figura 28 se observa el comportamiento del porcentaje de recirculación de lodos, indicando que a medida que disminuye el caudal el porcentaje de recirculación de lodos se incrementa, favoreciendo la degradación de la materia orgánica en el reactor biológico aerobio.



**Figura 28. Porcentaje de recirculación de lodos en función del caudal de la PTAR CETYS**

3. Mantener el OD de 2.0 mg/L en el reactor biológico aerobio.

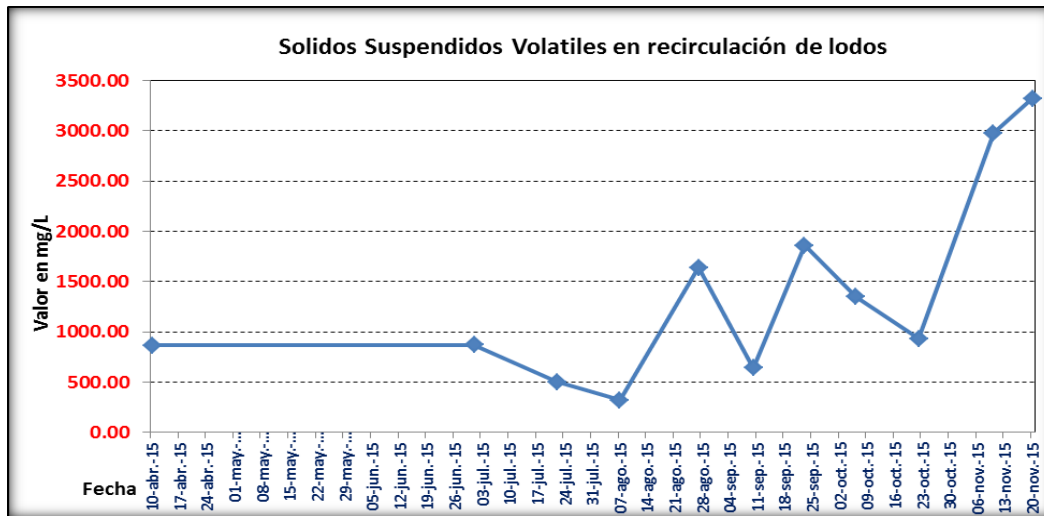
Para esto, el operador de PTAR CETYS realizó un monitoreo del OD cada 4 horas y cuando los valores eran menores a 2.0 mg/L, suministraba más oxígeno a través del segundo soplador. Los valores de OD en el reactor biológico aerobio se encuentran en la Figura 29 donde se graficó el promedio mensual de junio a noviembre de 2015.



**Figura 29. Promedios mensuales de OD en el reactor de la PTAR CETYS**

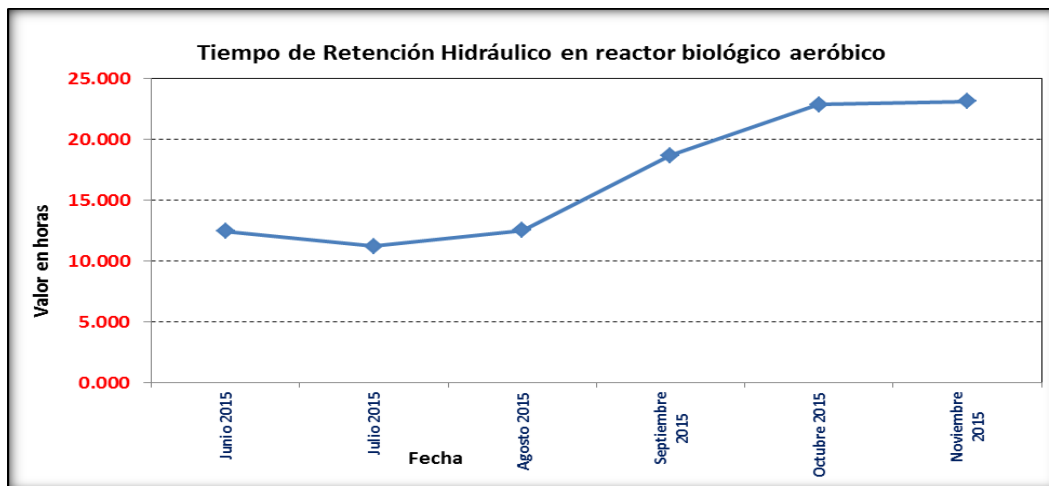
Debido a las acciones anteriores se puede observar el incremento de los SSV en la línea de recirculación de lodos, como lo indica la Figura 30.

Se puede observar como en abril del 2015 los SSV en la recirculación tenían un valor de 1,000 mg/L y a finales de noviembre se incrementaron hasta 3,200 mg/L.



**Figura 30. SSV en recirculación de lodos de abril a noviembre de 2015 en la PTAR CETYS**

En la evaluación del reactor se determinó el TMRC promedio de 2.23 días que debería estar entre 20 y 30 días. Se observa en la Figura 31 que el TRH con menos caudal se incrementa hasta alcanzar 23 h, cumpliendo con el rango de diseño de 18 a 36 h. Se observa el comportamiento de estos parámetros y su influencia en el crecimiento de la población de microorganismos, como resultado de las prácticas operativas implementadas.



**Figura 31. TRH en reactor biológico aerobio de la PTAR CETYS**

#### 4. Monitoreo de cloro residual

Adicionalmente, se adoptó esta práctica operativa que incluye medir 2 veces por turno el cloro residual en el efluente de la PTAR e incrementar la dosis de cloro.

#### 5.6 Sedimentador

El sedimentador tiene 56.28 m<sup>2</sup> y una altura promedio de 3.10 m, con un volumen de 174.46 m<sup>3</sup> (Figura 32). Para su evaluación se consideraron los caudales medidos de abril a noviembre de 2015 con el fin de determinar la eficiencia de la unidad.



**Figura 32. Sedimentador de la PTAR CETYS**

##### 5.6.1 TRH y carga superficial

El TRH se obtuvo utilizando la fórmula 3, la carga superficial con la fórmula 6 y cuyos resultados son indicados en la Tabla 31. Al caudal registrado se le restó el caudal de purga, equivalente a 0.92 L/s. Al reducir el caudal de operación se incrementó el TRH logrando decantar con mayor facilidad el floc de microorganismos que ingresan del reactor biológico aerobio. El parámetro de diseño de carga superficial fue de 16.71 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d, cuando el rango permisible es de 8.14 a 16.28 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d. Bajo esta consideración el sedimentador trabajó de forma eficiente, sólo que debe estar en el flujo de diseño máximo de 7 L/s. En cuanto al tiempo de contacto el promedio fue de 5.889 h por encima del valor de diseño de 4.42 h.

**Tabla 31. Resultados de caudal, carga superficial y TRH en sedimentador de la PTAR CETYS**

Fecha	Caudal	Carga superficial	TRH
	L/s	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d	h
10-abr-15	10.70	15.01	4.95
01-jul-15	12.60	17.93	4.14
22-jul-15	12.85	18.31	4.06
07-ago-15	11.27	15.89	4.68
27-ago-15	11.71	16.56	4.49
10-sep-15	9.63	13.37	5.56
23-sep-15	6.48	8.53	8.71
06-oct-15	7.76	10.50	7.08
22-oct-15	5.04	6.32	11.76
10-nov-15	5.60	7.18	10.35
20-nov-15	6.76	8.96	8.29
<b>Máximo</b>	<b>12.85</b>	<b>18.31</b>	<b>11.76</b>
<b>Mínimo</b>	<b>5.04</b>	<b>6.32</b>	<b>4.06</b>
<b>Promedio</b>	<b>9.13</b>	<b>12.60</b>	<b>6.73</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>2.76</b>	<b>4.23</b>	<b>2.57</b>

## 5.7 Desinfección

La cámara de contacto de cloro donde se lleva a cabo la desinfección la cual se puede ver en la Figura 33, tiene un área de 7.66 m<sup>2</sup> y un nivel de agua promedio de 1.13 m.

Para la evaluación de esta unidad, se consideraron los caudales registrados de abril a noviembre de 2015 determinando con ello la eficiencia de la unidad.



**Figura 33. Cámara de contacto de cloro de la PTAR CETYS**

### 5.7.1 Tiempo de contacto

En la Tabla 32 se muestra el tiempo de contacto que se obtuvo dividiendo el volumen de la unidad entre el caudal como lo indica la fórmula 3. Cabe mencionar que el tiempo de contacto óptimo es cuando se mantiene un caudal máximo de 4.55 L/s, por encima de este caudal se compromete la eficiencia del proceso de desinfección ya que mínimo de acuerdo al diseño debe tener 30 minutos.

**Tabla 32. Tiempo de contacto de cloro en la cámara de desinfección de la PTAR CETYS**

Fecha	Caudal	Tiempo de contacto
	L/s	min
01-jul-15	4.55	31.68
22-jul-15	3.59	40.18
27-ago-15	6.32	22.83
10-sep-15	6.19	23.31
23-sep-15	4.27	33.79
06-oct-15	4.21	34.27
<b>Máximo</b>	<b>6.320</b>	<b>40.185</b>
<b>Mínimo</b>	<b>3.590</b>	<b>22.826</b>
<b>Promedio</b>	<b>4.856</b>	<b>31.008</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>1.031</b>	<b>6.181</b>

### 5.7.2 Dosis de cloro

Para evaluar la dosis de cloro aplicada en el tanque de contacto de cloro, se utilizó el consumo mensual de hipoclorito de sodio al 13 % en el 2015, datos proporcionados por el Departamento de control de procesos de CESPМ y presentados en la Tabla 33.

**Tabla 33. Dosis de cloro aplicada en PTAR CETYS en 2015**

Mes	Dosis de cloro
	mg/L
Enero	3.56
Febrero	3.45
Marzo	2.55
Abril	3.97
Mayo	4.57
Junio	5.42
Julio	5.38
Agosto	5.62
Septiembre	15.67
Octubre	10.17
Noviembre	12.80
Diciembre	4.63
<b>Máximo</b>	<b>15.67</b>
<b>Mínimo</b>	<b>2.55</b>
<b>Promedio</b>	<b>6.48</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>3.95</b>

### 5.8 Filtración

Para la evaluación de la unidad de filtración (Figura 34) se tomaron las dimensiones de los filtros que son de placa de acero en forma circular con diámetro de 42 pulgadas.



**Figura 34. Filtros de la PTAR CETYS**

### 5.8.1 Tasa de filtración

La tasa de filtración se obtuvo utilizando la fórmula 6 con el área del filtro y cuyos resultados se muestran en la Tabla 34. La tasa de filtración de diseño para los filtros fue de 5.7 GPM/pie<sup>2</sup>. A 7 L/s de operación se mantiene esta tasa de filtración, por lo que no existe problema en los filtros, ya que hacia el campus CETYS Universidad no se registraron valores de caudal mayores a 7 L/s.

**Tabla 34. Tasa de filtración a diferentes caudales de operación de la PTAR CETYS**

Fecha	Caudal	Tasa de filtración
	L/s	GPM/ft <sup>2</sup>
01-jul-15	4.55	3.75
22-jul-15	3.59	2.96
27-ago-15	6.32	5.21
10-sep-15	6.19	5.10
23-sep-15	4.27	3.52
06-oct-15	4.21	3.47
<b>Máximo</b>	<b>6.320</b>	<b>5.207</b>
<b>Mínimo</b>	<b>3.590</b>	<b>2.958</b>
<b>Promedio</b>	<b>4.856</b>	<b>4.000</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>1.031</b>	<b>0.849</b>

### 5.9 Efluente

Para la evaluación del efluente se tomaron muestras simples para analizar DBO<sub>5</sub>, coliformes fecales, cloro residual y SST.

#### 5.9.1 DBO, coliformes fecales, cloro residual y SST

Los valores de DBO<sub>5</sub> y coliformes fecales en el efluente de la PTAR se registran en la Tabla 35. El porcentaje promedio de remoción de la DBO<sub>5</sub> es de 94.92 % durante las fechas de muestreos de abril a noviembre de 2015. En la memoria de diseño de la PTAR se considera una eficiencia de remoción del 98.88 %, por lo cual se considera eficiente el promedio registrado en los muestreos.

Es importante recalcar que el promedio de los coliformes fecales en el efluente es de 62,929 NMP/100 mL, lo cual es preocupante debido a que la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 [13] indica como límite máximo 1,000 NMP/100 mL.

**Tabla 35. Resultados de DBO<sub>5</sub> y coliformes fecales en efluente de PTAR CETYS**

Fecha	DBO <sub>5</sub>	Coliformes fecales
	mg/L	NMP/100 mL
10-abr-15	5.40	23.00
22-abr-15	35.55	46,000.00
01-jul-15	3.55	23.00
22-jul-15	12.20	46,000.00
19-ago-15	25.90	9,300.00
10-sep-15	N.A.	240,000.00
23-sep-15	N.A.	240,000.00
29-sep-15	4.07	20.00
09-oct-15	9.15	110,000.00
18-nov-15	7.10	430.00
30-nov-15	N.A.	430.00
<b>Máximo</b>	<b>35.550</b>	<b>240,000.00</b>
<b>Mínimo</b>	<b>3.550</b>	<b>20.00</b>
<b>Promedio</b>	<b>12.865</b>	<b>62,929.64</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>10.908</b>	<b>89,471.85</b>

Los valores de coliformes fecales en el periodo de estudio se presentaron a la par con el valor promedio de cloro residual que fue de 0.313 mg/L. En la Tabla 36 se pueden ver los promedios de cloro residual de los meses de septiembre, octubre y noviembre de 2015.

**Tabla 36. Resultados de cloro residual en efluente de PTAR CETYS**

Fecha	Cloro residual	Fecha	Cloro residual	Fecha	Cloro residual
	mg/L		mg/L		mg/L
07-sep-15	0.01	01-oct-15	0.18	02-nov-15	0.13
08-sep-15	0.09	04-oct-15	0.51	04-nov-15	0.08
09-sep-15	0.05	05-oct-15	0.07	08-nov-15	0.13
10-sep-15	0.90	06-oct-15	0.16	09-nov-15	0.15
13-sep-15	0.48	07-oct-15	0.40	-	-
16-sep-15	0.20	08-oct-15	0.51	-	-
17-sep-15	0.24	11-oct-15	0.54	-	-
21-sep-15	0.13	12-oct-15	0.53	-	-
22-sep-15	0.20	13-oct-15	0.14	-	-
23-sep-15	0.21	14-oct-15	0.17	-	-
24-sep-15	0.42	15-oct-15	0.27	-	-
27-sep-15	0.38	21-oct-15	0.60	-	-
28-sep-15	2.20	26-oct-15	1.02	-	-
29-sep-15	0.41	-	-	-	-
30-sep-15	0.42	-	-	-	-
<b>Máximo</b>	<b>2.200</b>	-	<b>1.020</b>	-	<b>0.150</b>
<b>Mínimo</b>	<b>0.010</b>	-	<b>0.070</b>	-	<b>0.080</b>
<b>Promedio</b>	<b>0.423</b>	-	<b>0.392</b>	-	<b>0.123</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>0.521</b>	-	<b>0.254</b>	-	<b>0.026</b>

Los SST en el efluente de la PTAR CETYS se presentan en la Tabla 37 donde el mínimo es de 20 mg/L y el máximo de 156 mg/L con un promedio de 49.31 mg/L.

**Tabla 37. Resultados de SST en efluente de PTAR CETYS**

Fecha	SST
	mg/L
13-feb-15	38.00
1-abr-15	20.00
28-may-15	24.00
1-jul-15	20.00
22-jul-15	20.00
7-ago-15	56.00
19-ago-15	30.00
27-ago-15	20.00
10-sep-15	156.00
23-sep-15	113.00
29-sep-15	20.00
6-oct-15	20.00
9-oct-15	20.00
22-oct-15	156.00
18-nov-15	26.00
30-nov-15	50.00
<b>Máximo</b>	<b>156.00</b>
<b>Mínimo</b>	<b>20.00</b>
<b>Promedio</b>	<b>49.31</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>46.48</b>

### **5.10 Información histórica de operación de PTAR CETYS**

Para evaluar otras condiciones operativas que estén ligadas a las actividades realizadas en campo y laboratorio se solicitó al Departamento de Control de Procesos (Laboratorio) y al Departamento de Aguas Residuales de CESP, el histórico de consumo de reactivos químicos, indicadores de costo por metro cúbico de agua tratada y volumen de agua residual tratada.

La Tabla 38 muestra los valores brindados por CESPМ: volumen de agua residual tratada y caudal promedio mensual durante el 2015, es notorio que a partir de septiembre el caudal de operación bajó considerablemente debido a que se implantó el ajuste del caudal, ya que anteriormente se habían manejado valores por encima de los 11 L/s de flujo.

**Tabla 38. Volumen de agua residual cruda tratada en el 2015 en PTAR CETYS**

Mes	Volumen tratado	Caudal promedio mensual
	(m <sup>3</sup> )	(L/s)
Ene	29,215	10.91
Feb	22,580	9.33
Mar	25,520	9.53
Abr	26,180	10.10
May	28,447	10.62
Jun	26,377	10.18
Jul	26,563	9.92
Ago	27,748	10.36
Sep	19,905	7.68
Oct	17,893	6.68
Nov	18,277	7.05
Dic	22,473	8.39
Total	291,178	
<b>Máximo</b>	<b>29,215.000</b>	<b>10.908</b>
<b>Mínimo</b>	<b>17,893.000</b>	<b>6.680</b>
<b>Promedio</b>	<b>24,264.833</b>	<b>9.229</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>3,770.777</b>	<b>1.373</b>

La CESPМ también cedió los resultados de DBO<sub>5</sub>, SST y coliformes fecales analizados en el efluente de PTAR CETYS del 2016, los cuales se observan en la Tabla 39, y los valores de febrero hasta agosto de 2017 están indicados en la Tabla 40. En ambas tablas en la segunda columna están registrados los números de control interno que utilizan para identificar las muestras en el laboratorio de CESPМ.

En la Tabla 39 se presentan los promedios anuales en el efluente de 14.3 mg/L de DBO<sub>5</sub>, 43.0 mg/L de SST y 37,213 NMP/100 mL para los coliformes fecales.

Independientemente de los caudales manejados, en 6 de los 15 valores de coliformes fecales proporcionados presentan incumplimiento a los límites de la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 [13]

**Tabla 39. Resultados de DBO<sub>5</sub>, SST y coliformes fecales en efluente PTAR CETYS en 2016**

Fecha	No. Muestra	DBO <sub>5</sub>	SST	Coliformes fecales
		mg/L	mg/L	NMP/100 mL
04-ene-16	10558	28.4	56	240.00
29-feb-16	10844	9.10	19	93.00
01-abr-16	10967	7.47	38	430.00
20-abr-16	11061	9.47	52	150.00
05-may-16	11144	4.06	20	93.00
18-may-16	11184	5.05	32	2,100.00
01-jun-16	11235	33.66	72	390.00
20-jun-16	11330	14.20	32	240,000.00
20-jul-16	11500	25.35	62	930.00
29-jul-16	11545	17.6	38	2,800.00
12-ago-16	11621	9.15	36	46,000.00
17-ago-16	11640	27.40	66	240,000.00
28-sep-16	11846	7.32	60	24,000.00
04-nov-16	12025	8.80	40	930.00
14-dic-16	12244	7.47	22	43.00
	<b>Máximo</b>	<b>33.66</b>	<b>72.00</b>	<b>240,000.00</b>
	<b>Mínimo</b>	<b>4.06</b>	<b>19.00</b>	<b>43.00</b>
	<b>Promedio</b>	<b>14.30</b>	<b>43.00</b>	<b>37,213.27</b>
	<b>Desv. Est.</b>	<b>9.37</b>	<b>16.67</b>	<b>80,471.12</b>

En la Tabla 40 se observan los promedios de febrero a agosto de 2017 para DBO<sub>5</sub> de 21.83 mg/L, SST de 47.60 mg/L y los coliformes fecales de 77,642.86 NMP/100 mL. De todos los valores mostrados resaltan los coliformes fecales pues superan el límite de 1,000 NMP/100ML de la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 [13].

**Tabla 40. Resultados de DBO<sub>5</sub>, SST y coliformes fecales en efluente PTAR CETYS en 2017**

Fecha	No. Muestra	DBO <sub>5</sub>	SST	Coliformes fecales
		mg/L	mg/L	NMP/100 mL
15-feb-17	0208	13.20	54.00	4,300.00
03-abr-17	0431	50.80	92.00	9,300.00
23-jun-17	0864	10.15	38.00	2,400.00
30-jun-17	0881	26.40	34.00	46,000.00
12-jul-17	0925	10.15	20.00	1,500.00
4-ago-17	1029	20.30	N/A	240,000.00
9-ago-17	1056	N/A	N/A	240,000.00
	<b>Máximo</b>	<b>50.80</b>	<b>92.00</b>	<b>240,000.00</b>
	<b>Mínimo</b>	<b>10.15</b>	<b>20.00</b>	<b>1,500.00</b>
	<b>Promedio</b>	<b>21.83</b>	<b>47.60</b>	<b>77,642.86</b>
	<b>Desv. Est.</b>	<b>14.20</b>	<b>24.70</b>	<b>103,668.49</b>

N/A: No analizado

### 5.11 Aplicación de mejoras

Las 4 propuestas de mejoras implantadas en la PTAR CETYS, fueron:

- 1.- Ajustar el caudal de afluente hasta en 5.5 L/s.
- 2.- Incrementar el porcentaje de recirculación de lodos al reactor biológico aeróbico.
- 3.- Mantener un OD mínimo de 2 mg/L en el reactor biológico aeróbico mayor.
- 4.- Aumentar la dosis de cloro obteniendo un cloro residual de por lo menos 0.50 mg/L.

Con estas mejoras implementadas se continuó con el muestreo tal y como se venía realizando. En la en diciembre se incrementaron los SSVLM en el reactor biológico aerobio. En el mes de noviembre baja la relación alimento microorganismo y en la línea de recirculación de lodos se incrementaron los SSV.

Esto significa que estas acciones fueron adecuadas para mejorar la eficiencia de los procesos, al operar la PTAR CETYS al caudal de diseño se incrementan los SSVLM, lo cual es un muy importante para la degradación de la materia orgánica y además alcanzan valores de hasta 1,600 mg/L logrando estar dentro de los valores recomendados para operación que van de 1,500 a 5,000 mg/L de SSVLM, cuando antes de esta acción se tenían valores máximos de 600 mg/L de SSVLM.

Con estas mejoras también se incrementó el tiempo de retención en el desarenador el cual llegó hasta 300 s, lo cual beneficia en la remoción de partículas discretas, hasta antes de esta acción los tiempos eran menores a 150 s.

Así mismo; en los meses de octubre y noviembre se registraron promedio de OD en el reactor biológico aerobio de 1.32 mg/L y 1.21 mg/L respectivamente, cuando anteriormente se tenían promedios de OD de 0.62 mg/L y 0.49 mg/L en los meses de julio y agosto respectivamente, por lo que este incremento de OD favorece el crecimiento de microorganismos necesarios para la degradación de la materia orgánica.

También; debido a estas mejoras se incrementó el tiempo de retención hidráulico del reactor biológico aerobio logrando mantenerlo en lo recomendado por las bases de diseño que es de 18 a 36 horas, con esta mejora alcanzó un valor de 22 h y 23 h en octubre y noviembre respectivamente, antes de las mejoras se tenía un valor menor a 15 h.

La recirculación de los lodos es muy importante para incrementar la cantidad de microorganismos en el reactor biológico aerobio y degradar la materia orgánica; en virtud de las mejoras aplicadas, los SSV en la recirculación se incrementaron hasta en 3,320 mg/L en noviembre, antes de los ajustes realizados en la planta se tenían 860 mg/L como máximo en el mes de abril. De acuerdo los autores Metcalf & Eddy [28], este valor debe estar por encima de 10,000 mg/L, lo cual indica que, si bien se incrementó dicho valor, falta incrementar el porcentaje de recirculación. Durante esta evaluación el porcentaje de recirculación llegó hasta 70 %, cuando antes de esta mejora se tenía un valor del 30 %. Los valores de diseño recomendados indican un valor de entre 50 y 150 % de recirculación.

También se logró disminuir la relación A/M en mgDBO<sub>5</sub>/mgSSVLM.d, muy cercano a los valores de diseño de 0.05 a 0.15. En noviembre se tenía un valor de 1.6 después debido a las mejoras implantadas se logró un valor de 0.17.

Se realizó una medición del caudal del afluente a la PTAR CETYS y del efluente. Se procedió a calcular el balance de agua utilizada, para conocer la cantidad de agua tratada que se estaba derramando por el vertedor de demasías y el costo de esta agua desperdiciada. La CESPM proporcionó el costo del agua residual tratada con un valor de 9.4 pesos/m<sup>3</sup> para el mes de junio y 6.6 pesos/m<sup>3</sup> para el mes de julio del 2015. Basándonos en el volumen de agua desalojada por el vertedor de demasías registrada en esta evaluación, se calculó el costo en pesos que se generaba por dicha acción durante 20 días, dichos costos se presentan en la Tabla 41.

**Tabla 41. Costo de agua residual tratada vertida a demasías**

<b>Días</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Costo unitario (pesos/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Costo total (pesos)</b>
25-jun-15	248	9.40	2,331.20
26-jun-15	368	9.40	3,459.20
29-jun-15	1127	9.40	10,593.80
30-jun-15	439	9.40	4,126.60
01-jul-15	493	6.60	3,253.80
02-jul-15	621	6.60	4,098.60
03-jul-15	457	6.60	3,016.20
07-jul-15	1633	6.60	10,777.80
08-jul-15	316	6.60	2,085.60
09-jul-15	187	6.60	1,234.20
13-jul-15	1128	6.60	7,444.80
14-jul-15	923	6.60	6,091.80
<b>Máximo</b>	<b>1,633.00</b>	<b>9.40</b>	<b>10,777.80</b>
<b>Mínimo</b>	<b>187.00</b>	<b>6.60</b>	<b>1,234.20</b>
<b>Promedio</b>	<b>661.67</b>	<b>7.53</b>	<b>4,876.13</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>425.20</b>	<b>1.32</b>	<b>3,060.37</b>
<b>Total en 20 días</b>			<b>58,513.6</b>
<b>Costo promedio por día</b>			<b>2,925.68</b>
<b>Costo anual</b>			<b>1,067,873</b>

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones

1.- Se confirma la Hipótesis: “La PTAR CETYS está operando de forma deficiente, lo cual genera incumplimiento en algunos parámetros de la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 [13] aplicable al reúso de aguas tratadas en sector público.”

La Tabla 42 muestra los parámetros de DBO<sub>5</sub>, SST y coliformes fecales en el efluente de 2015, 2016 y 2017 comparados con los límites de la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 [13]. Se concluye que los valores de los parámetros de operación de SST y coliformes fecales en la PTAR CETYS están arriba del límite que marca dicha norma.

**Tabla 42. Resultados de DBO, SST y coliformes fecales en 2015, 2016 y 2017 en efluente de PTAR CETYS y los límites de la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 [13]**

Referencia	DBO <sub>5</sub> (mg/L)			SST (mg/L)			Coliformes fecales (NMP/100 mL)		
	2015	2016	2017	2015	2016	2017	2015	2016	2017
NOM-003-SEMARNAT-1997 [12]	30.00			30.00			1,000.00		
Efluente PTAR CETYS	12.86	14.30	21.83	49.31	43.00	47.60	62,929.64	37,213.27	77,642.86
% fuera de norma	En norma			64.36	43.33	58.66	6,292.96	3,721.32	7,764.28

2.- Se cumplió con el objetivo general de “Evaluar el funcionamiento de la PTAR CETYS y elaborar propuestas para mejorar la eficiencia de operación”. En la Tabla 43 se presenta un comparativo de los parámetros operativos con los valores respectivos de diseño, de evaluación y los porcentajes de los que están fuera de diseño.

De los 23 parámetros operativos evaluados, sólo 10 están dentro del valor de diseño, lo cual corresponde a una eficiencia del 43.47 %.

**Tabla 43. Promedio anual 2015 de parámetros operativos comparados con los valores de diseño de PTAR CETYS**

Parámetro	Valor de diseño	Valor promedio Evaluación 2015	% Fuera de diseño
<b>Desbaste grueso:</b>			
Separación de barras	10.00, 2.50 y 0.50 cm	0.00, 1.90 y 0.00 cm	66.66
Pérdida de carga	0.1524 m	0.00017 m	En diseño
<b>Bombeo de agua residual:</b>			
CDT	11.14 m	36.62 m	328.72
Caudal	7.00 L/s	7.00 L/s	En diseño
<b>Desarenador:</b>			
Tiempo de retención	30.00 s (mínimo)	180.20 s	En diseño
<b>Tamizado:</b>			
Tamaño de malla	< 2.30 mm	1.50 mm	En diseño
<b>Reactor biológico aerobio:</b>			
pH	6 - 8	7.83	En diseño
Temperatura	24.84 – 14.31 °C	32.66 °C	31.48
TRH	18 -36 h	17.22 h	4.52
TMRC	20 – 30 d	2.23 d	896.86
OD	2.00 mg/L	0.92 mg/L	217.39
A/M	0.05 – 0.15 mgDBO <sub>5</sub> /mgSSVLM.d	0.74 mgDBO <sub>5</sub> /mgSSVLM.d	493.33
Carga orgánica	0.10 - 0.40 kg/DBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup> .d	0.20 kg/DBO <sub>5</sub> /m <sup>3</sup> .d	En diseño
SSVLM	1,500 - 5,000 mg/L	567.30 mg/L	264.41
Recirculación	50 - 150 %	42.71 %	17.06
<b>Sedimentador:</b>			
TRH	2.60 - 4.00 h	6.73 h	68.25
Carga superficial	8.14 - 16.28 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d	12.60 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .d	En diseño
<b>Desinfección:</b>			
Tiempo de contacto	30.00 min	31.00 min	En diseño
Dosis de cloro	8.00 mg/L	6.48 mg/L	23.45
<b>Filtración:</b>			
Tasa de filtración	5.70 GPM/ft <sup>2</sup>	4.00 GPM/ft <sup>2</sup>	En diseño
<b>Efluente:</b>			
Coliformes fecales	1,000.00 NMP/100 mL	62,929.64 NMP/100 mL	6,192.96
DBO <sub>5</sub> mg/L	30.00 mg/L	12.86 mg/L	En diseño
SST	30.00 mg/L	49.31 mg/L	64.36

Debido a cambios operativos realizados en la PTAR CETYS se reflejaron mejoras en los parámetros de evaluación de algunos procesos evaluados, los cuales incluyeron en; aumentar el caudal de recirculación de lodos al reactor biológico aerobio, disminuir el caudal del afluente y aumentar el TRH, incrementar del OD y la dosis de cloro.

Con estas mejoras no fue posible cumplir con los límites de los coliformes fecales en el efluente de la planta, aun cuando el cloro residual varió de 0.01 mg/L a 2.20 mg/L, por lo que se requiere mayor vigilancia en la dosis de cloro.

La PTAR CETYS puede estar dentro de sus parámetros de diseño si se opera de forma eficiente realizando los ajustes operativos en los procesos de tratamiento, como son recirculación de lodos, control del flujo de tratamiento, dosificación de cloro, alimentación de oxígeno en el reactor biológico aerobio, purga de lodos, mantener los SSVLM dentro de diseño, entre otros; todo esto, sin realizar inversión económica a la infraestructura de la planta.

3.- La PTAR CETYS se debe operar con el flujo de diseño máximo de 7 L/s. Flujos mayores a este valor alteran los procesos de tratamiento. En la aplicación de mejora de bajar el caudal al requerido, se demostró que se estaba gastando aproximadamente 1'067,873 pesos anuales por no cuidar el caudal de demasías. Es decir, se trataba un caudal mayor al que se bombea al campus de CETYS Universidad y la diferencia de caudal afluente y efluente se desaloja a un vertedor de demasías que se incorpora nuevamente al drenaje sanitario de la ciudad.

4.- Existe una colocación de rejillas de desbaste grueso con un solo espesor de barras. Se requiere colocar rejillas de desbaste en tamaño gradual, gruesa, media y fina, para evitar taponamiento súbito del equipo de bombeo.

5.- El equipo de bombeo de agua cruda está sobredimensionado y no es el que requiere la PTAR CETYS, para proporcionar el caudal de tratamiento, se cierra parcialmente la válvula de descarga. Se requiere suministrar el equipo de bombeo de agua residual cruda de diseño, ya que el actual suministra demasiado flujo y altera los procesos de tratamiento. Con el actual equipo de bombeo de agua cruda residual no es posible regular el flujo de forma óptima; porque al hacerlo, la válvula de regulación se obtura y acumula de sólidos al grado de tapar por completo la línea de impulsión lo cual lleva al deterioro del sistema de bombeo y suspende el caudal de tratamiento.

6.- El desarenador funciona de forma óptima porque cuenta con los tiempos de retención necesarios para remoción de partículas discretas, sólo que debe ubicarse antes del bombeo de agua residual cruda para evitar deterioro y daño del sistema de impulsión de agua a los procesos. Actualmente se ubica justo después del bombeo. Para el caso de desarenadores de vórtice, las bases de diseño señalan que el tiempo de retención debe ser mínimo 30 segundos para promover la decantación de las partículas discretas, especialmente aquellas de 0.20 mm de diámetro. No se presenta incumplimiento en esta unidad de tratamiento, solo falta reubicarlo antes del bombeo de agua residual al ingreso de la PTAR CETYS.

7.- El tamiz funciona de forma adecuada. La remoción de SST se encuentra dentro de su rango de operación.

8.- La determinación de OD en el reactor biológico aerobio debe ser medida de forma sistemática por lo menos cada 2 horas para tomar las acciones correspondientes y colocar este valor por lo menos 2 mg/L. En esta evaluación, se registraron valores promedio menores a 2 mg/L, y al ser un parámetro fundamental en el desarrollo de los microorganismos se debe tener especial atención a este parámetro.

9.- No existe medición confiable de los lodos de recirculación en el reactor biológico aerobio. La medición del caudal en la recirculación en los lodos debe estar accesible y segura para el operador. Este valor, indispensable para la determinación alimento microorganismo, actualmente no se mide y durante esta evaluación se realizó por desplazamiento de volumen. Falta colocar medidor de caudal.

10.- El sedimentador presenta valores de TRH y carga superficial dentro de los parámetros de diseño. En el sedimentador se debe tener especial atención con los sólidos flotantes, ya que su presencia en esta unidad de tratamiento se relaciona con organismos filamentosos, los cuales son indeseables para la remoción de materia orgánica. Durante esta evaluación los sólidos flotantes cubrían toda el área del sedimentador.

La presencia de estos organismos filamentosos, refleja una ineficiencia en la unidad anterior que es el reactor biológico aerobio, por la falta de OD en valores mayores a 2 mg/L por lo que se debe tener especial atención a ello.

11.- En el sedimentador se debe colocar un medidor de flujo de desecho, para poder controlar el TMRC y llevarlo a su valor de diseño.

12.- En la desinfección se requiere suministrar la dosis de cloro necesaria para mantener una cantidad de coliformes fecales en un valor de 1,000 NMP/100 mL. Con la información proporcionada por CESPМ referente a los consumos de cloro en la PTAR CETYS se calcularon las dosis de cloro las cuales tienen un promedio de 6.48 mg/L. Se puede observar que cuando se aplicaron las mejoras a la planta, en los meses de septiembre a noviembre la dosis de cloro se incrementó en más de 10 mg/L. Además; en relación con los coliformes fecales se tienen promedios mayores a 1,000 NMP/100 mL, lo cual representa además de un incumplimiento a la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 [13], un riesgo de salud, ya que esta agua residual tratada es utilizada para regar los campos deportivos y áreas verdes de las instalaciones de CETYS Universidad, teniendo en riesgo de serios y graves problemas de salud para el alumnado y personal en general de esa Universidad que tienen contacto indirecto con esta agua residual tratada. El reporte de consumo de cloro que entrega el departamento de control de procesos de CESPМ, señala que utilizar cloro gas como agente desinfectante es más beneficioso en costos que utilizar hipoclorito de sodio que actualmente se usa. Sin embargo, señala que sería más riesgoso utilizar cloro gas, por su cuidadoso manejo y el riesgo que emana el hecho de utilizar ese gas. En esta evaluación se tiene como resultado que el riesgo se encuentra actualmente con la baja dosis de cloro suministrada. Se observó que la dosis de cloro no tiene una metodología eficiente, porque el operador suministra cloro a razón de una alimentación constante de la bomba dosificadora, sin realizar una prueba de laboratorio que determine la demanda de cloro que requiere el agua para mantener coliformes fecales menores a 1,000 NMP/100 mL.

13.- Los filtros operan en su tasa de filtración adecuada. Se debe monitorear las condiciones del medio filtrante por lo menos cada año. En esta evaluación se obtuvo información que transcurre más de un año sin darle el respectivo mantenimiento.

14.- El efluente de calidad de agua a la salida de la PTAR no es de cumplimiento constante a la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1994 [13].

En reportes obtenidos por el mismo organismo operador los valores de DBO y coliformes fecales en algunos meses superan los límites permitidos.

## **6.2 Recomendaciones**

1.- Ajustar al flujo de diseño de la PTAR CETYS. En caso de requerimiento futuro de mayor volumen de tratamiento, prever el desarrollo del proyecto de ampliación. Adquirir el equipo de bombeo que requiere para bombear máximo 7 L/s de agua cruda en dirección al reactor biológico aerobio.

2.- Rediseñar el pretratamiento del agua cruda residual, para llevar la secuencia lógica de las unidades de tratamiento, esto es, primero el desbaste grueso, medio y fino, después de ellos el desarenador. Seguido del desarenado, el sistema de bombeo de agua residual cruda.

3.- Colocar un medidor de OD en línea en el reactor biológico aerobio. Con esta medida el operador tendrá en tiempo real este valor para tomar las acciones de control de este parámetro con oportunidad.

4.- Colocar medidores de flujo de recirculación y purga de lodos. Con esta medida el operador puede tener el control del TMRC, necesario para optimizar el funcionamiento del reactor biológico aerobio.

5.- Cambiar las válvulas que están fallando en el ingreso de aire al reactor biológico aerobio, para eliminar la fuga de aire existente e incrementar el aprovechamiento del oxígeno en esta unidad.

6.- Se recomienda revisar el volumen y nivel de lodos, implementar un programa de monitoreo del nivel para purgar los lodos y mantener los que se recircularan al reactor biológico aerobio.

7.- Se recomienda utilizar cloro gas como desinfectante. Esta aplicación debe estar de forma automática en función del flujo y cloro residual, tal y como se aplica en las plantas potabilizadoras de CESP. Con un buen entrenamiento en el manejo seguro de cloro gas y con el equipo para control de fugas, se minimiza el riesgo por fuga. Actualmente el Departamento de potabilización de CESP cuenta con personal capacitado bajo este rubro, debe extenderse este desarrollo de conocimiento y manejo seguro de cloro gas al personal operativo de esta PTAR, así como la adquisición del equipo correspondiente. Otra opción es la desinfección por medio de rayos ultravioleta u ozono.

Además, se recomienda que al agua residual que sale del sedimentador e ingresa a la cámara de contacto de cloro realizarle la prueba de demanda de cloro requerido para mantener los coliformes fecales menores a 1,000 NMP/100 mL a la salida de la PTAR CETYS.

8.- Se requiere realizar un mantenimiento preventivo a los filtros. Esta actividad debe asegurar que el medio filtrante tenga el espesor de diseño, tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad de diseño, así como estar libre de bolas de lodo. Para ello, se recomienda que una vez al año se realice examen de granulometría del medio filtrante.

9.- Vincular mediante reuniones de trabajo a los integrantes responsables del tratamiento del agua residual de la PTAR CETYS: encargados de operación y laboratorio y directivos. De esta forma, los resultados obtenidos en el laboratorio deben ser comunicados a operación y directivos para realizar los ajustes de operación, inversión o capacitación y mantener la PTAR en condiciones normativas. Una implantación de un sistema de calidad como el ciclo de Deming (Edwards Deming), PHVA Planear, Hacer, Verificar y Actuar es recomendado para mantener sistemáticamente la PTAR dentro de los límites de la Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1994 [13].

10.- Capacitar al personal operativo en todos los niveles, sobre diseño y evaluación de plantas de tratamiento de aguas residuales. En esta evaluación se demostró que técnicamente y sin inversiones cuantiosas, la PTAR puede entrar en cumplimiento a la normatividad vigente en reúso de aguas residuales. Esta recomendación es muy importante, ya que la PTAR opera desde el 2008 y los problemas de calidad en el efluente aún persisten.

11.- Considerar por lo menos tener 2 turnos con personal de operación. Actualmente la PTAR CETYS cuenta solamente con personal operativo en planta en el turno diurno y queda a criterio del personal de vigilancia el reporte de un suceso que considere anomalía dentro de la misma.

## Referencias bibliográficas

[1] Mayo Peternell Eduardo (2010). Tesis “Proyecto ejecutivo de planta de tratamiento de aguas residuales para la localidad de Xochiapa, Ver.” Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Veracruzana, Región Xalapa. Octubre. <http://cdigital.uv.mx/handle/123456789/30564>

[2] UNAD Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. Lección 20. Consultado 25 de mayo de 2015 [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358039/ContenidoLinea/leccion\\_20\\_modelos\\_de\\_reactores\\_y\\_caracteristicas.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358039/ContenidoLinea/leccion_20_modelos_de_reactores_y_caracteristicas.html)

[3] Fernández, A.; Letón P.; Rosal, R.; Dorado, M.; Villar, S.; Sanz Juana. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Informe de vigilancia tecnológica, Universidad de Alcalá. Consultado 25 de mayo de 2015

[4] Agua.org.mx (2014) Fondo para la comunicación y la educación ambiental. A.C. <http://www.agua.org.mx/h2o/images/stories/REDCUENCAS/capitulo%2002%20FINAL.pdf> consultado 3 diciembre del 2014

[5] Escalante, V., Cardozo, L., Ramírez, E., Moeller, G., Mantilla, G., Montecillos, J., Servín, C. y Villavicencio, F. (2003) *El reúso del agua residual tratada en México*. Seminario internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales, IMTA, 2003

[6] INEGI. (2010). Censo de población y vivienda 2010. Recuperado el día 17 de noviembre del 2014 [http://www.inegi.org.mx/sistemas/consulta\\_resultados/iter2010.aspx](http://www.inegi.org.mx/sistemas/consulta_resultados/iter2010.aspx)

[7] Juárez, J. (2016). “Evaluación y optimización del funcionamiento de la Planta Potabilizadora Xochimilco en Mexicali, B.C.” Tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería. Universidad Autónoma de Baja California. Mexicali, B.C., México.

[8] Manual de operación PTAR CETYS. Noviembre 2009. CESP. Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali.

[9] CONAGUA (2009). Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación.

[10] Yersinia Olvera Vidal, (2010). Arranque y Optimización de la PTAR-UABC Guadalupe Victoria, Valle de Mexicali, B.C; diciembre 2010

[11] Juárez-Rodríguez J.; Juárez-Vázquez; J., Romero, S.; Reyes, J.; Herrera, A.; Solís, F.; Zlatev, R.; Stoytcheva, M.; Gallegos, R.; (2016). Libro “Avances en investigación ambiental en la UABC, conociendo nuestro ambiente 2016” Capítulo 3 “Tratamiento biológico del agua residual domestica: Evaluación del proceso en una planta en la ciudad de Mexicali” ISBN 978-607-607-331-5 publicado el 5 de agosto de 2016

[12] Manual de depuración de aguas residuales urbanas. (2015) Alianza por el agua. Consultado el 9 de enero de 2017

[http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/28632CE6BFC3905505257DC6007FA19C/\\$FILE/1\\_pdfsam\\_MONOGRAFICO3.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/28632CE6BFC3905505257DC6007FA19C/$FILE/1_pdfsam_MONOGRAFICO3.pdf).

[13] SEMARNAT (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicio público.

[14] Sartor, A.; Cifuentes, O. (2012). “Propuesta de ley para reúso de aguas residuales” Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina.

[15] Lazarova, V. (2006). “Source Global Water Intelligence”. Citada en “La utilización del agua, la alternativa de hoy”. Presentación en las jornadas técnicas sobre recarga artificial de acuíferos y reúso de agua, por la Comisión Estatal del Agua, Jalisco 2008 México.

[16] Mujeriego, R. (2006). “La reutilización del agua. Aspectos reglamentarios, sanitarios, técnicos y de gestión”. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.

[17] Díaz de León Barroso, U. (2006). “Saneamiento Integral y reúso Industrial y en la Agricultura en San Luis Potosí”. En 4<sup>th</sup> World Water Forum. México. (pp. 1-18).

[18] Yannian Zhou et al (2011). “Status and development for municipal wastewater reuse in china”. En International Simposium water and resource and Enviromental Protection. Beiging. China.

[19] SEMARNAT (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales y bienes nacionales.

[20] SEMARNAT (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

- [21] SEMARNAT (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final.
- [22] SEMARNAT (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003. Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.
- [23] CONAGUA (2007). Norma Oficial Mexicana NOM-015-CONAGUA-2007. Características y especificaciones de las obras y del agua para infiltración artificial a acuíferos.
- [24] Alejandro Marsilli (2005). Tratamiento de aguas residuales. Consultado: 25 de mayo de 2015 <http://www.tierramor.org/Articulos/tratagua.htm>
- [25] Loaiza, N., Jimmy, L., Fall, Ch., (2010). *Modelación del proceso de lodos activados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Noreste, Apodaca, N.L.* Ciencia UANL, Vol. XIII, Núm. 1, enero-marzo, 2010, pp. 46-54 Universidad Autónoma de Nuevo León México.
- [26] Planta de Tratamiento de aguas residuales. Consultado 27 de mayo 2015 <http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/AutomatizacionMaster/archivos/TAR.doc>
- [27] Navarro, A., y Palladino L., (2009) *Degradación de Efluentes Líquidos Mediante Lechos Fluidizados*, Wastewater Degradation using Fluidized Beds Inf. tecnol. v.20 n.5 La Serena 2009.
- [28] Marsilli, A., (2005) *Tratamiento de aguas residuales*, Diciembre 2005, Disponible en: <http://www.tierramor.org/Articulos/tratagua.htm>
- [29] Metcalf & Eddy (1997). Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización, McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V., México, 752 páginas.
- [30] Noyola, A. (1998). Anaerobio vs aerobio, un debate (casi) superado. Biológico vs primario avanzado, ¿el nuevo debate? Ingeniería y Ciencias Ambientales, vol. 10, No. 34, pp.10-14
- [31] Méndez, L.; Miyashiro V.; Rojas, R.; Cotrado, M.; Carrasco, N. (2004). Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados a escala de laboratorio, Treatment of residual waters by means of activated muds, Rev. Inst. Investig. Fac. Minas metal cienc. Geogr v.7 n.14 Lima jul. 2004/dic.
- [32] Ramalho, R., (2003). *Tratamiento de aguas residuales.*, Edición revisada, Barcelona, Editorial Reverté, S. A., 705 págs.

- [33] Esqueche Angles Carlos Armando (2013). Residuos sólidos: Contactores biológicos, Publicado 13 de febrero de 2013. <https://carlosesquecheangles.wordpress.com/tag/residuos-sólidos/>. Consultado 25 de mayo 2015
- [34] Souza, E.M. (1986) “Criteria for the utilization design and operation of UASB reactors”. Post conference international seminar on anaerobic treatment in tropical Countries, Sau Pauli. Br.
- [35] Eckenfelder, W.W.; Patozka. J.B.; Pulliam, G.W. (1998): “Anaerobic versus Aerobic Treatment in the USA” A Ware Incorporated, 227 French Landing, Nashville, TN 37228, USA.
- [36] Avella, G. (2001). “Evaluación del comportamiento hidrodinámico de un reactor UASB y su influencia en la remoción de materia”. Tesis para optar por el grado de M.C. Ingeniería Sanitaria y ambiental. Universidad del Valle de Colombia.
- [37] Tilley, E.; Luthi,C.; Morel, A.; Zurbrugg, C.; Schertenleib, R. (2010). Compendio de Sistemas y Tecnologías de Saneamiento. EAWAG, Alianza por el Agua y la Cooperación Suiza en América Central. <http://www.alianzaporelagua.org/Compendio/index.html> Consultado el 25 de mayo del 2015
- [38] Tilley, E; Ulrich, L.; Luethi, C.; Reymond, P.; Zurbruegg, C. (2014). Sustainable Sanitation and Water Management. Anaerobic Filter. [http://www.sswm.info/content/anaerobic-filter#reference\\_book7934](http://www.sswm.info/content/anaerobic-filter#reference_book7934). Consultado 11 de agosto 2016
- [39] TD Water Technologies and Development. SBR – Reactor Discontinuo Secuencial. 2009. <http://www.t-and-d-italy.com/es/products/wastewater/sbr-plants/>. Consultado 25 de mayo 2015.
- [40] Procesos de tratamiento de efluente líquidos III: Tratamientos biológicos aerobios. Escuela Universitaria de Ingeniería Vitoria-Gasteiz, Universidad del País Vasco. ISSN 2255-2316. [https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/9531/mod\\_folder/content/0/Tema\\_13.\\_Tratamientos\\_biologicos\\_aerobios.ppt?forcedownload=1](https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/9531/mod_folder/content/0/Tema_13._Tratamientos_biologicos_aerobios.ppt?forcedownload=1).
- [41] Droppelmann, Carmen V, & Oettinger, Michael. (2009). Tratamiento en Lodo Activado del Lixiviado de un Relleno Sanitario. *Información tecnológica*, 20(1), 11-19. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642009000100003>
- [42] SCFI (1980). Norma Mexicana NMX-AA-003-1980. Agua residuales.- Muestreo.

[43] SCFI (2001). Norma Mexicana NMX-AA-028-SCFI-2001. Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO<sub>5</sub>) y residuales tratadas. Método de prueba.

[44] SCFI (2001). Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001. Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba.

[45] SCFI (2001). Norma Mexicana NMX-AA-108-SCFI-2001. Determinación de Cloro libre y Cloro total. Método de prueba.

[46] SCFI (1987). Norma Mexicana NMX-AA-42-1987. Determinación del número más probable (NMP) de coliformes totales, coliformes fecales (termotolerantes) y *Escherichia coli* Presuntiva.

[47] IMTA y CEA, B.C. (2005) Instituto Mexicano de Tecnología del agua y Comisión Estatal del Agua, Baja California. *Curso de Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales*. ISBN en trámite. Jiutepec, Morelos, México.