



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE PLANEACIÓN URBANA Y REGIONAL

Propuesta teórico-conceptual de tratamiento de agua residual en una industria química a partir de sus condiciones de operación en 2018.

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LIENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA:

ANA KAREN CHAVEZ VALDEZ

DIRECTOR:

Dr. En C. HUEMANTZIN BALAN ORTIZ OLIVEROS



TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO. AGOSTO 2019

Existe una cuestión fundamental que los ambientalistas no se preguntan lo suficiente, y ni hablar de lo que contesten: ¿por qué está ocurriendo la destrucción del mundo natural?

Curtis White

Índice general

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11
1. ESQUEMA DE LA INVESTIGACIÓN.....	13
1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA EMPRESA DE ESTE ESTUDIO	13
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.3 JUSTIFICACIÓN	16
1.4 OBJETIVO GENERAL	17
1.5 OBJETIVOS PARTICULARES.....	17
1.6 HIPÓTESIS	18
1.7 DIAGRAMA DE MATERIALES Y MÉTODOS	19
1.8 DESCRIPCIÓN DE MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
1.9 ANTECEDENTES.....	22
1.10 COMENTARIOS FINALES DEL CAPÍTULO	23
2. MARCO CONCEPTUAL	24
2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS DEL AGUA.....	24
<i>2.1.1 Características físicas</i>	24
2.1.1.1 Temperatura	24
2.1.1.2 Color	24
2.1.1.3 Olor	25
2.1.1.4 Turbiedad	25
2.1.1.5 Materia flotante	26
2.1.1.6 Sólidos	26
2.1.1.7 Grasas y aceites	27
<i>2.1.2 Características químicas</i>	27
2.1.2.1 Alcalinidad	28
2.1.2.2 pH	28
2.1.2.3 Dureza	28
2.1.2.4 Nitrógeno	28
2.1.2.5 Fósforo	29
2.1.2.6 Azufre	29
2.1.2.7 Fenoles	29
2.1.2.8 Sustancias Activas al Azul de Metileno	29
2.1.2.9 Oxígeno disuelto	30
2.1.2.10 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅).....	30
2.1.2.11 Demanda química de oxígeno (DQO)	30
<i>2.1.3 Características microbiológicas</i>	30
2.1.3.1 Organismos coliformes totales	31
2.1.3.2 Organismos coliformes fecales	31
2.1.3.3 Huevos de helminto	31
2.2 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	31
<i>2.2.1 Tratamientos físicos</i>	33
2.2.1.1 Desbaste	33
2.2.1.2 Homogeneización	34

Tabla 3 Características de algunos reactivos coagulantes	38
Tabla 4 Comparación de los principales métodos de desinfección del agua	40
Tabla 5. Valores típicos de los coeficientes cinéticos para el proceso de lodos activados para aguas residuales domésticas.....	43
Tabla 6 Características típicas del agua residual.....	50
Tabla 7 Eficiencias de remoción de contaminantes por tecnologías	51
Tabla 8. Uso y descarga de aguas residuales en instalaciones sanitarias	57
Tabla 9. Uso y descarga de agua en la limpieza de áreas no operativas.....	57
Tabla 10. Generación de agua residual de procesos internos	58
Tabla 11. Generación de agua residual de procesos externos	58
Tabla 12. Muestreo interno de aguas residuales de procesos y servicios en la planta	70
Tabla 13 Matriz multi criterio para la selección del sistema de tratamiento de aguas residuales.....	76
Tabla 14 Datos del proyecto	77
Tabla 15 Resumen de cálculos del proyecto.....	82

Índice de figuras

Figura 1 Esquema general del sistema de pre tratamiento de aguas residuales de procesos.....	14
Figura 2 Metodología de la investigación	19
Figura 3 Intervalos de los contaminantes presentes en agua residual	27
Figura 4 Diseño de rejillas de desbaste.....	33
Figura 5 Ejemplo de tanque de homogeneización.....	34
Figura 6 Esquema de un sistema de flotación por aire disuelto	35
Figura 7 Esquema de un sistema de flotación por aire disuelto	35
Figura 8 Tipos de sedimentación	36
Figura 9 Sedimentación por compresión	36
Figura 10 Esquema de filtración por gravedad	37
Figura 11 Esquema de filtración a presión.....	37
Figura 12 Esquema general del proceso coagulación-floculación	39
Figura 13 Esquema de un sistema convencional de lodos activados.....	44
Figura 14 Esquema de un sistema SBR	45
Figura 15 Esquema de un reactor biológico de lecho móvil	45
Figura 16 Esquema de humedal de flujo superficial	47
Figura 17 Esquema humedal artificial de flujo subsuperficial vertical.....	47
Figura 18 Esquema humedal de flujo subsuperficial horizontal	48
Figura 19 Caudal de agua residual de la empresa	56
Figura 20 Proporción del agua residual de la empresa de acuerdo al área de generación	59
Figura 21 Concentración de sólidos en el efluente de la planta	60
Figura 22 Carga contaminante por sólidos en el efluente	61
Figura 23 Concentración de grasas y aceites en el efluente	62
Figura 24 Carga contaminante grasas y aceites en el efluente.....	62
Figura 25 Concentración DQO y DBO en el efluente	63
Figura 26 Carga contaminante DQO y DBO en el efluente	64
Figura 27 Concentración de Nitrógeno Total en el efluente.....	65
Figura 28 Carga contaminante de Nitrógeno en el efluente.....	65

Figura 29 Concentración de fenoles en el efluente	66
Figura 30 Carga contaminante de fenoles en el efluente	67
Figura 31 Concentración de SAAM en el efluente	68
Figura 32 Carga contaminante de SAAM en el efluente	68
Figura 33 Diagrama de procesos y puntos de muestreo de agua residual	69
Figura 34 a) esquema general de una planta con SBR b) esquema general de una planta con SBR corte transversal	83

RESUMEN

Debido a que la calidad del efluente de aguas residuales de la empresa de este estudio no es la adecuada para su descarga en cuerpos de agua ni alcantarillado municipal, el efluente es transferido hacia una planta tratadora externa. Sin embargo, en los últimos años la empresa se ha hecho acreedora a multas ya que el efluente excede las concentraciones de Nitrógeno Total y Sustancias Activas al Azul de Metileno establecidas para su tratamiento.

Como una propuesta de solución a esta problemática, primeramente, se estimó el caudal de agua residual de la empresa y se evaluó su calidad en los últimos ocho años. Posteriormente, se determinaron las concentraciones de Nitrógeno Total y Sustancias Activas al Azul de Metileno en los diferentes efluentes de la organización. A partir de lo anterior, se eligió el sistema de tratamiento más adecuado para la empresa por medio de una matriz multi criterio y se calcularon los parámetros básicos de diseño.

Los resultados concluyen que, la empresa genera en promedio 11 m³ de aguas residuales al día, de los cuales el 97 % proviene de las instalaciones sanitarias y el 3 % de procesos de limpieza industrial. Las concentraciones altas de Nitrógeno no son un problema reciente, lo que se atribuye a que el agua residual de servicios sanitarios no recibe ningún tipo de tratamiento interno. Por otra parte, las altas concentraciones de Sustancias Activas al Azul de Metileno se han hecho más recurrentes en los últimos dos años, lo cual indica que el sistema de tratamiento interno de aguas de procesos no está cumpliendo eficientemente su función.

De esta forma, se sugiere la implementación de un sistema de tratamiento específico para el agua residual de servicios sanitarios y mejorar prácticas operativas en el sistema de tratamiento de agua de procesos. De acuerdo con la matriz multi criterio, el tratamiento más conveniente es por medio de reactores discontinuos secuenciales (SBR por sus siglas en inglés), cuyos costos de operación son bajos siempre que se realice un proceso adicional de deshidratación y estabilización de lodos.

ABSTRACT

Because the quality of the effluent of wastewater from the company in this study is not suitable for discharge into bodies of water or municipal sewage, the effluent is transferred to an external treatment plant. However, in recent years the company has been subject to fines as the effluent exceeds the concentrations of Total Nitrogen and Active Substances to Methylene Blue established for its treatment.

As a solution proposal to this problem, the wastewater flow of the company was first estimated and its quality was evaluated in the last eight years. Subsequently, the concentrations of Total Nitrogen and Active Substances were determined to Methylene Blue in the different effluents of the organization. Based on the above, the most appropriate treatment system for the company was chosen through a multi-criteria matrix and the basic design parameters were calculated.

The results conclude that the company generates on average 11 m³ of wastewater per day, of which 97% comes from sanitary facilities and 3% from industrial cleaning processes. On the other hand, high concentrations of Total Nitrogen are not a recent problem and it is attributed to the fact that wastewater from sanitary services does not receive any type of internal treatment. Likewise, the high concentrations of Active Substances to Methylene Blue have become more recurrent in the last two years, which indicates that the system of internal treatment of process waters is not efficiently fulfilling its function.

In this way, the project proposes to implement a specific treatment system for wastewater from sanitary services and improve operational practices in the process water treatment system. According to the multi-criterion matrix, the most convenient treatment is by means of Sequencing Batch Reactors (SBR), whose operating costs are low provided that an additional process of dehydration and sludge stabilization is carried out.

INTRODUCCIÓN

Debido a las crecientes preocupaciones ambientales y las reglamentaciones más estrictas respecto al recurso hídrico, cada vez más industrias desarrollan programas e implementan tecnologías para su ahorro, uso eficiente, así como en el tratamiento pre y post consumo. Esto aporta beneficios para el ambiente, la salud pública y las finanzas internas, a través de la mejora en la calidad del agua, la conservación de los ecosistemas acuáticos y la protección a las fuentes de agua potable (EPA, 2017).

En la organización de este estudio las actividades productivas principales son la formulación, empaque y re empaque de productos químicos de especialidad fitosanitaria para usuarios finales en el mercado nacional e internacional.

De manera general, el efluente de aguas residuales de la empresa no cumple con las características para su descarga en bienes nacionales o alcantarillado municipal, por lo que éste se transfiere a una planta tratadora externa. Bajo este panorama, la empresa se ha hecho acreedora a multas por sobrepasar las concentraciones de contaminantes solicitadas para su tratamiento, principalmente Nitrógeno Total y Sustancias Activas al Azul de Metileno.

A partir de lo anterior, el presente proyecto busca optimizar el manejo del agua residual en la organización bajo estudio, mediante una propuesta teórico-conceptual de tratamiento biológico de aguas residuales por medio de reactores discontinuos secuenciales (SBR por sus siglas en inglés) partiendo, según la literatura especializada, de su alta eficiencia de remoción de contaminantes, versatilidad y adaptabilidad operativa, principalmente.

En la primera sección, se detalla el esquema general de la investigación en el que se mencionará el contexto de la empresa, seguido del planteamiento del problema, la justificación del proyecto, los objetivos que persigue la investigación, hipótesis, metodología de trabajo y finalmente antecedentes del tratamiento de aguas residuales.

En seguida, se describen las propiedades físicas, químicas y biológicas que componen al agua residual, seguido de esto, se indican las características básicas de operación de algunas tecnologías de tratamiento de aguas, así como los criterios de selección para cada caso.

Posteriormente, en el marco legal, se señala la normativa ambiental aplicable en materia de: responsabilidad ambiental empresarial, aguas residuales y de residuos o subproductos del tratamiento de aguas.

En la siguiente sección, se presentan los resultados de la investigación, los cuales se dividen en: 1) estimación del caudal de agua residual de la empresa; 2) análisis histórico de la calidad del efluente de la empresa; 3) determinación de las concentraciones de nitrógeno total y sustancias activas al azul de metileno en áreas de la empresa; 4) selección del sistema de tratamiento y 5) el diseño básico conceptual del sistema de tratamiento.

Finalmente, en el último capítulo se señalan las conclusiones y recomendaciones obtenidas a lo largo de la elaboración de este proyecto.

1. ESQUEMA DE LA INVESTIGACIÓN

En esta sección se detalla el contexto de la empresa, seguido del planteamiento del problema, la justificación del proyecto, los objetivos que persigue la investigación, hipótesis, metodología de trabajo y finalmente antecedentes del tratamiento de aguas residuales.

1.1 Características de la empresa de este estudio

La organización se ubica en el municipio de Lerma, Estado de México. Sus actividades productivas principales son la formulación, empaque y re empaque de productos químicos de especialidad fitosanitaria en presentación líquida y sólida para usuarios finales en el mercado nacional e internacional.

En ella, colaboran alrededor de 190 operadores de producción, 28 empleados administrativos y 35 empleados contratistas. Dispone de diez unidades de producción que operan en promedio tres de ellas al día las 24 horas durante 300 días al año.

El agua utilizada en sus operaciones proviene en su totalidad de un pozo de extracción interno, la cual se potabiliza y se almacena para su uso en formulación de producto y servicios sanitarios.

Dado que la empresa se ubica en una zona geográfica propensa a inundaciones, ésta cuenta con un sistema de emergencia que colecta el agua pluvial y la transfiere hacia una laguna artificial interna, en donde una parte se evapora naturalmente y el resto se bombea hacia el colector de aguas residuales de la planta.

En lo que refiere al agua residual, ésta se divide en dos tipos: agua residual de servicios sanitarios y agua residual de procesos productivos tanto internos como externos. Ambos efluentes se colectan en drenajes separados, los cuales convergen en el colector de aguas residuales del parque industrial para su transferencia a una planta tratadora.

El agua residual de servicios sanitarios procede de áreas como oficinas administrativas, comedor (sin preparación de alimentos), sanitarios y regaderas. Como parte de las acciones para el ahorro de agua en las instalaciones, las regaderas e inodoros son de tipo “ecológicos”. Además, productos como lejía o sosa no están permitidos para la limpieza debido a políticas de salud ocupacional. Cabe destacar que el efluente no recibe algún tipo de pre tratamiento interno previo a su transferencia a la planta tratadora externa.

El agua residual de procesos, proviene de la limpieza de pasillos de las unidades de producción, equipo de protección personal (mascarillas) y eventualmente, limpieza de maquinaria. Dado que el efluente de aguas residuales puede contener restos de producto, éste recibe pre tratamiento interno por medio de un sistema de fosas de aireación y floculación-sedimentación.

Como se muestra en la **Figura 1**, el sistema de pre tratamiento de aguas residuales de procesos se compone de cuatro fosas y tiene como finalidad reducir la presencia de producto en el efluente.

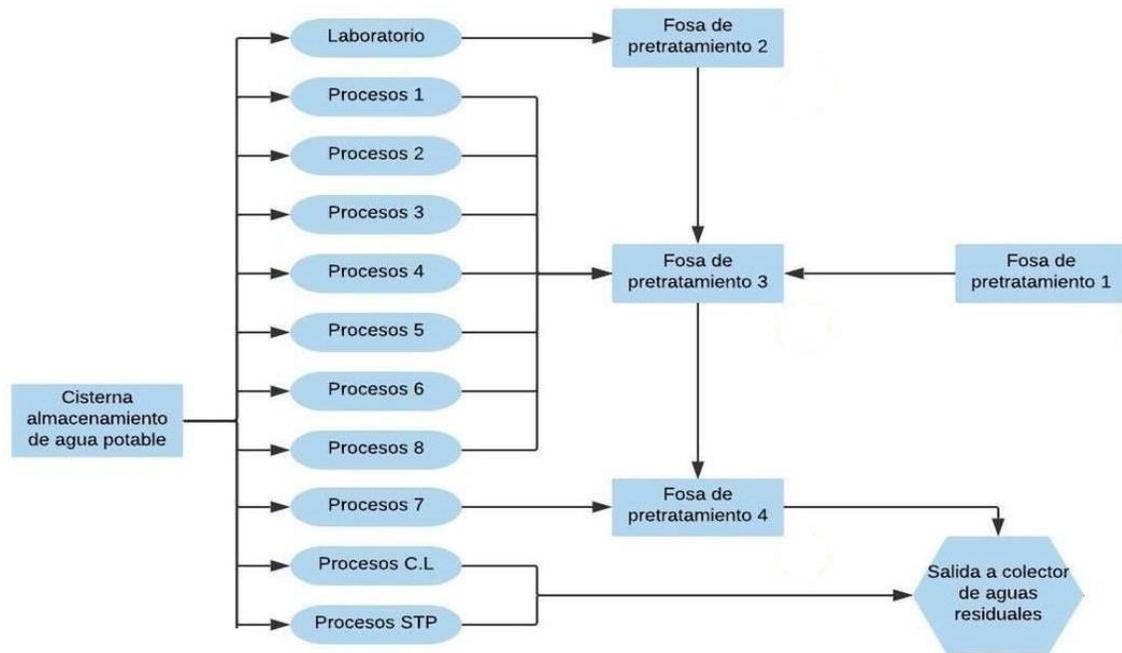


Figura 1 Esquema general del sistema de pre tratamiento de aguas residuales de procesos

La fosa “1” recibe el agua residual procedente de los procesos externos a las instalaciones de la planta, misma que periódicamente llega en contenedores IBC. Una vez que el agua residual se vierte en ésta fosa, los sólidos sedimentables se ponen en suspensión, previo a su transferencia a la fosa “3”.

La fosa “2” recibe el agua residual procedente del laboratorio de calidad. Una vez que su capacidad es igual al 50%, se ponen en suspensión los sólidos sedimentables por espacio de cinco minutos para su posterior transferencia a la fosa “3”, siempre que la capacidad de esta última sea menor a 80%.

La fosa “3” recibe el agua procedente de las unidades de producción, con excepción de la unidad 7, C.L y STP. Esta fosa tiene como propósito la adición de coagulantes para la separación de sólidos coloidales, sin embargo, en operaciones normales únicamente se hace funcionar el sistema de alimentación de aire sin la adición de estos productos. Una vez que la capacidad de la fosa es mayor igual al 80% esta se transfiere a la fosa “4”.

En la fosa “4” el efluente se mezcla con el agua de proceso de la unidad de producción 7. En esta última fase los sólidos presentes en el efluente sedimentan. Posteriormente, el agua se transfiere al colector de aguas residuales del parque industrial.

Actualmente, el efluente de la empresa es monitoreado bimestralmente por personal de la planta tratadora externa, quienes emiten reportes de calidad de agua y es quien adjudica multas en caso de incumplimiento con los parámetros establecidos para el tratamiento.

1.2 Planteamiento del problema

En México se genera cada segundo 218 m³ de aguas residuales provenientes de la industria, de las cuales el 38.7 % recibe tratamiento en alguna de las 3 025 plantas tratadoras industriales en operación en el país. No obstante, la reutilización del agua tratada como alternativa a fuentes de abastecimiento superficiales o subterráneas es de 8.6 m³/s, lo que representa solo el 10.27 % del caudal tratado (CONAGUA, 2018).

En el caso de la empresa de éste estudio, el efluente no cumple con las características para su descarga en bienes nacionales o alcantarillado municipal, por lo que éste se transfiere a una planta tratadora externa. Bajo este panorama, la empresa se ha hecho acreedora a multas por no cumplir con las características físico-químicas que son solicitadas en su tratamiento ya que excede las concentraciones establecidas de Nitrógeno Total y Sustancias Activas al Azul de Metileno.

Económicamente, esta situación representa pérdidas para la compañía por concepto de tratamiento de efluentes y multas.

Desde el punto de vista ambiental, la presión sobre las fuentes de abastecimiento de agua potable se mantiene constante, ya que el agua tratada no se reincorpora a la organización para su reutilización.

Además, el prestigio de la empresa se ve afectado al no responder propositivamente ante las exigencias ambientales y las metas globales de la compañía en su compromiso con el ambiente.

En este contexto, surge la necesidad de una propuesta para el adecuado manejo del agua residual de la organización, la cual coadyuve en la reducción, prevención y mitigación de la contaminación sobre el recurso hídrico durante las operaciones de la empresa, en conformidad con las medidas regulatorias aplicables.

1.3 Justificación

Durante las últimas décadas, la incesante demanda por recursos hídricos y su mal uso han incrementado la contaminación y agravado el estrés hídrico en muchas partes del mundo, por lo que el agua se ha convertido en un factor limitante, en lugar de un factor facilitador del bienestar social, ambiental y económico (Lambarri Beléndez & Vázquez del Mercado Arribas, 2017).

Una de las recomendaciones para controlar la contaminación hídrica, de acuerdo a la experiencia de los diferentes cuerpos de investigación en el tema, es el tratamiento individual o común de efluentes con composición físico química similar, ya que es una alternativa mucho más puntual, económica y efectiva (González A. & otros, 2010).

A partir de las necesidades de la empresa para la optimización del manejo del agua residual, las actuales características del efluente así como las condiciones de la empresa en materia de aguas residuales y, tomando en consideración la política de mejora continua y reducción de costos de la organización, se propone un sistema de tratamiento de aguas residuales, por medio de reactores de discontinuos secuenciales (SBR por sus siglas en inglés).

Esta tecnología es una variante del proceso de lodos activados, la cual ofrece muchas más ventajas en la eliminación de nutrientes y materia orgánica en comparación con los sistemas convencionales, además de su buen rendimiento tanto para afluentes domésticos como industriales (Muños Paredes & Ramos, 2014).

A diferencia del actual sistema de tratamiento externo, los principales beneficios de ésta propuesta no solo implican ahorros económicos para la compañía por concepto de tratamiento de aguas y multas, también contribuye a la disminución de la huella hídrica en sus operaciones, mediante la reutilización del efluente tratado.

En caso contrario, no solo seguiría implicando conflictos con grupos de interés por incumplimiento regulatorio, también conlleva no poder acceder a incentivos económico-ambientales por parte de las autoridades mexicanas, además de posibles conflictos en el futuro, ante cambios más estrictos en la normativa ambiental y la creciente sensibilidad de las personas respecto a los temas ambientales.

1.4 Objetivo general

Elaborar una propuesta teórico-conceptual de tratamiento del agua residual en la organización bajo estudio por medio de reactores discontinuos secuenciales a fin de coadyuvar en la reducción, control y prevención de la contaminación del agua.

1.5 Objetivos particulares

- Estimar el volumen de agua residual de la organización.
- Analizar el desempeño histórico de la calidad del efluente de la organización.
- Determinar las concentraciones de nitrógeno total y sustancias activas al azul de metileno en los diferentes efluentes internos de la organización.
- Seleccionar el sistema de tratamiento adecuado según las características y necesidades de la organización.
- Proponer el diseño básico conceptual del sistema de tratamiento elegido.

1.6 Hipótesis

La propuesta teórico-conceptual de un sistema de tratamiento de aguas residuales permitirá optimizar el manejo del agua residual de la organización, coadyuvando a la prevención, reducción y control de la contaminación del agua.

1.7 Diagrama de materiales y métodos

Para obtener los resultados deseados en la investigación se llevaron a cabo las actividades de la **Figura 2:**

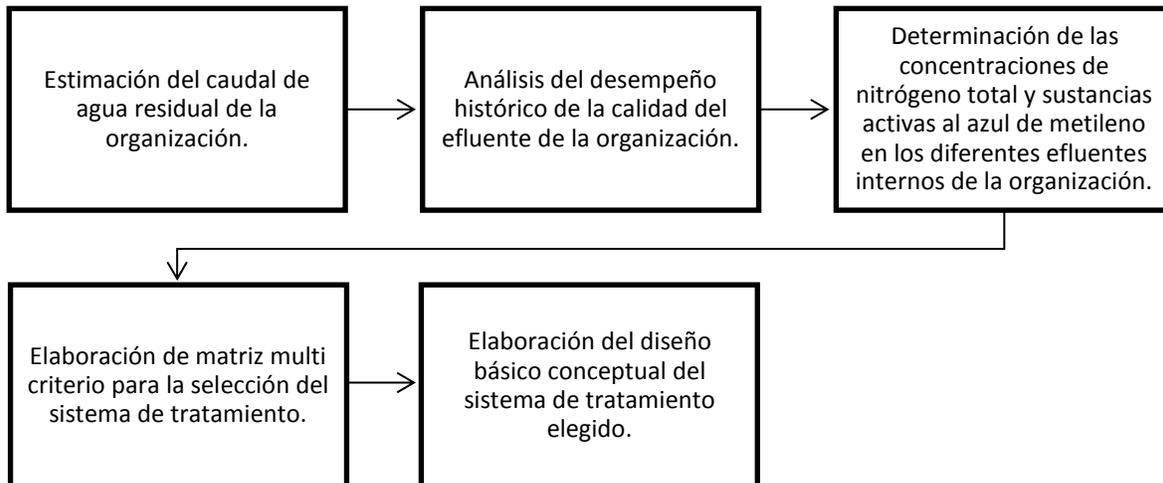


Figura 2 Metodología de la investigación (Elaboración propia)

1.8 Descripción de materiales y métodos

Estimación del caudal de agua residual de la organización.

A partir de la información obtenida en los monitoreos bimestrales al efluente de aguas residuales de la empresa durante el periodo 2016-2018, se identificaron el caudal máximo, mínimo y promedio generado diariamente.

La proporción de agua residual de procesos productivos (limpieza de unidades de producción y equipo de protección personal) y de servicios (regaderas, baños, comedor y limpieza de oficinas) se estimó a partir del consumo aparente de agua potable al día para cada caso, en el cual se consideró un factor de retorno de 0.7 sugerido en la literatura especializada (Metcalf & Eddy INC., 1995).

Análisis del desempeño histórico de la calidad del efluente de la organización.

Con base en los resúmenes anuales de los monitoreos al caudal de agua residual en el periodo 2010-2018, se realizó un análisis estadístico para identificar tendencias y promedios en la concentración y carga contaminante de los siguientes parámetros: Sólidos Totales; Sólidos Suspendidos; Grasas y Aceites; DBO₅; DQO; Nitrógeno Total; Fenoles y Sustancias Activas al Azul de Metileno.

Determinación de las concentraciones de nitrógeno y sustancias activas al azul de metileno en los diferentes efluentes internos de la organización.

Con el objetivo de identificar las áreas cuya agua residual excede las concentraciones límite de Nitrógeno Total y Sustancias Activas al Azul de Metileno, solicitadas externamente para su tratamiento integral, se colectó una muestra simple representativa de los siguientes efluentes: drenaje de servicios; drenaje pluvial y en las cuatro fosas de pre tratamiento de aguas residuales de procesos.

Las muestras se almacenaron en recipientes inertes (polietileno), se identificaron y fueron preservadas en frío. El análisis cuantitativo se realizó en el Laboratorio de Análisis Industriales ARVA S.A de C.V acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA).

Elaboración de una matriz multi criterio para la selección del sistema de tratamiento.

Para seleccionar el sistema de tratamiento adecuado según las necesidades y contexto de la organización se elaboró una matriz multi criterio. De esta forma, se seleccionaron catorce criterios de decisión. Se asignó un peso relativo de 5 si tiene importancia e implicación sobresaliente frente a los demás criterios, mientras que un peso relativo de 3, corresponde a un criterio con menores implicaciones e impactos (CAR Cundinamarca, 2011).

Los criterios de decisión para este proyecto fueron los siguientes:

- Costos de construcción (5)
- Costos de operación y mantenimiento (5)
- Tolerancia a altas o bajas cargas hidráulicas (5)
- Calidad del efluente de salida (5)
- Requerimiento mínimo de área (5)
- Seguridad laboral (5)
- Experiencia comprobada (5)
- Flexibilidad o riesgos de rendimiento (5)
- Cantidad de biosólidos (5)
- Requerimientos mínimos de energía (3)
- Problemas potenciales por condiciones atmosféricas (3)
- Simplicidad operacional (3)
- Capacidad de expansión modular (3)

- Facilidad para mejorar procesos (3)

Únicamente se contemplaron sistemas de tratamiento disponibles en el mercado local a fin de evitar un aumento considerable en los costos de importación e instalación de tecnología. Dichos sistemas fueron: 1) sistema convencional de lodos activados, 2) reactores discontinuos secuenciales (SBR), 3) reactores biológicos de lecho móvil (MBBR) y 4) sistemas de humedales artificiales.

Finalmente, se asignó una puntuación de 5 en caso de sobresaliente, 3 suficiente y 1 deficiente para cada tecnología según el criterio de decisión correspondiente. Lo anterior tomó como referencia las experiencias señaladas en la bibliografía, información proporcionada por los fabricantes y la experiencia de la autora como colaboradora en la organización bajo estudio.

Elaboración del diseño básico conceptual del sistema de tratamiento elegido.

Con base en la metodología propuesta por Crites & Tchobanoglous, 2000, Eckenfelder, 1970, Von Sperling, 2007 para el diseño conceptual básico de reactores discontinuos secuenciales se determinó: 1) Generación diaria y mensual de lodos primarios; 2) Volumen del tanque de homogeneización; 3) Volumen del reactor biológico; 4) Generación diaria y mensual de lodos secundarios; 5) Tiempo de cada ciclo.

De igual forma se calculó el costo de disposición de lodos residuales, en donde los costos por kilogramo se estimaron en 3.5 pesos para residuos que cumplen los criterios de residuo de manejo especial y 5 pesos en caso de residuos peligrosos.

1.9 Antecedentes

En las diferentes culturas, tanto orientales como occidentales, se empleaba el agua de las fuentes aledañas al asentamiento humano y de diversas formas se reingresaba a la misma fuente, dejando a la naturaleza a cargo de la depuración del líquido. Mientras la población no era excesiva, el agua se diluía sin mayor problema y los pobladores de aguas abajo podían usarla con mínimo riesgo. Sin embargo, con el rápido crecimiento de la población y las ciudades, los ríos comenzaron a convertirse desagües de aguas contaminadas que implicaban problemas de salud para la población (Teorema Ambiental, 2006).

Aunque la captación y drenaje de aguas pluviales datan de tiempos antiguos, la recogida de aguas residuales no aparece hasta principios del siglo XIX, mientras que su tratamiento sistemático data de finales del siglo XIX y principios del siglo XX. En esta época comenzaron a utilizarse los avances en microbiología para tratar las aguas residuales y fue hasta 1914 que los ingenieros Edward Arden y William T. Lockett, descubrieron los “fangos activos”, uno de los sistemas de tratamiento biológico para la depuración de la contaminación orgánica de aguas residuales que todavía son utilizados. (We Are Water Foundation, 2017).

El proceso de fangos activos continúa siendo el proceso de tratamiento biológico más utilizado en la depuración de aguas residuales desde su invención. Sin embargo, se han introducido numerosas mejoras y variantes del proceso, principalmente enfocadas a la eliminación de nutrientes además de la eliminación de la materia orgánica (Buitrón Méndez, et al., 2018).

Actualmente, se dispone de una gran variedad de tratamientos de aguas residuales como nunca antes, los cuales se ocupan de la eliminación de materia orgánica biodegradable, sólidos en suspensión y patógenos presentes en el agua residual, y desde mediados del siglo XX para la eliminación de nutrientes y metales pesados (Buitrón Méndez, et al., 2018).

Las investigaciones e innovaciones en el tratamiento del agua residual continúan y hoy en día la atención se centra principalmente en: 1) los contaminantes tóxicos emergentes, que tienen el potencial de actuar como disruptores endocrinos o acumularse en el ciclo del agua y afectar los ecosistemas; 2) la eficiencia operacional de las plantas de tratamiento nuevas y antiguas; 3) la reutilización de aguas tratadas debido a las regulaciones y demandas locales; 4) la desinfección segura del agua y 5) la disposición final de lodos residuales en una forma ambientalmente sustentable.

1.10 Comentarios finales del capítulo

Además de las necesidades de la empresa para optimizar el manejo del agua residual, cabe destacar que el presente proyecto surge por interés de la autora y como parte de los requisitos del programa “Estancias profesionales” de la empresa en cuestión. Por lo tanto, el nombre de la empresa, los productos que fabrica y documentación adicional se omitieron bajo común acuerdo.

2. MARCO CONCEPTUAL

En esta sección se describen las propiedades físicas, químicas y biológicas que componen al agua residual, seguido de esto, se indican las características básicas de operación de algunas tecnologías de tratamiento de aguas, así como los criterios de selección para cada caso.

2.1 Características físicas, químicas y microbiológicas del agua

El conocimiento de las características del agua residual es fundamental en cualquier proyecto de tratamiento. La calidad del agua se asocia con los límites de sustancias que pudieran estar presentes en ella, los cuales son determinados por la normativa de cada país y de acuerdo al uso que se le pretende dar.

A continuación, se detallan las características físicas, químicas y biológicas del agua residual contempladas para el diseño de este proyecto.

2.1.1 Características físicas

Involucra aquellas características del agua que tienden a ser eliminadas o reducidas en las primeras operaciones unitarias del tren de tratamiento de aguas. Engloban aspectos como temperatura, color, olor, turbiedad, sólidos, grasas y aceites, las cuales se describen a continuación.

2.1.1.1 Temperatura

La temperatura del agua es un parámetro que afecta directamente las reacciones químicas y las velocidades de reacción, así como la vida acuática y la adecuación del agua para fines benéficos. La temperatura óptima para el desarrollo de la actividad bacteriana está en el rango de 23 a 35 °C. Los procesos de digestión aerobia y nitrificación se detienen cuando la temperatura alcanza valores del orden de los 50 °C. Cuando la temperatura se acerca a los 15 °C, las bacterias productoras de metano cesan su actividad, y alrededor de los 5 °C las bacterias autotróficas nitrificantes dejan de actuar. Cuando la temperatura es de 2 °C, se alcanza incluso la inactivación de bacterias químio heterotróficas que actúan sobre la materia orgánica carbonácea (Metcalf & Eddy INC., 1995).

2.1.1.2 Color

El agua pura no es incolora; tiene un tinte azul verdoso pálido en grandes volúmenes. Es necesario diferenciar entre color verdadero debido al material en solución y el color aparente debido a la materia suspendida (Tebbutt, 1991).

En forma cualitativa, el color puede ser usado para estimar la condición general del agua residual, si el color es café claro, el agua residual lleva aproximadamente 6 horas después de su descarga, mientras que un color gris claro es característico de aguas que han sufrido algún grado de descomposición o que han permanecido un tiempo corto en los sistemas de recolección, si el color

es gris oscuro o negro, se trata en general de aguas sépticas que han sufrido una fuerte descomposición bacteriana bajo condiciones anaerobias (Metcalf & Eddy INC., 1995).

2.1.1.3 Olor

Normalmente, los olores son debidos a los gases liberados durante el proceso de descomposición de la materia orgánica, algunos compuestos olorosos asociados al agua residual se ejemplifican en la **Tabla 1**.

Tabla 1 Compuestos olorosos asociados al agua residual

COMPUESTOS OLOROSOS	FORMULA QUÍMICA	CALIDAD DEL OLOR
Aminas	$\text{CH}_3\text{NH}_2, (\text{CH}_3)_3\text{N}$	A pescado
Amoniaco	NH_3	Amoniacal
Diaminas	$\text{NH}_2(\text{CH}_2)_4\text{NH}_2, \text{NH}_2(\text{CH}_2)_5\text{NH}_2$	Carne descompuesta
Sulfuro de hidrógeno	H_2S	Huevos podridos
Mercaptanos (p.e metilo y etilo)	$\text{CH}_3\text{SH}, \text{CH}_3(\text{CH}_2)\text{SH}$	Coles descompuestas
Mercaptanos (p.e butilo y crotilo)	$(\text{CH}_3)_3\text{CSH}, \text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{SH}$	Mofeta
Sulfuros orgánicos	$(\text{CH}_3)_2\text{S}, (\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{S}$	Coles podridas
Escatol	$\text{C}_9\text{H}_9\text{N}$	Materia fecal

(Metcalf & Eddy INC., 1995)

La incidencia y problemática asociada a los olores en el agua viene marcada por dos aspectos: pH y temperatura. Y ello es debido a que, en general, las sustancias con incidencia organoléptica suelen estar afectadas por un equilibrio ácido-base. Además, cualquier sustancia que provoque olor, acentúa esta circunstancia cuando su presión de vapor y su volatilidad son mayores, es decir, cuando la temperatura del agua es más alta (UJAEN, 2007).

2.1.1.4 Turbiedad

La turbiedad es un indicador de la calidad del agua en relación con la materia coloidal y en suspensión. Su medición se realiza por comparación entre la intensidad de luz dispersada en una muestra y la luz dispersa en una suspensión de referencia bajo las mismas condiciones (Standard Methods, 1989).

Los valores de turbiedad sirven para determinar el grado de tratamiento requerido por una fuente de agua cruda, su filtrabilidad, y consecuentemente, la tasa de filtración más adecuada, la efectividad de los procesos de coagulación, sedimentación y filtración así como para determinar la potabilidad del agua (Romero Rojas, 2000).

2.1.1.5 Materia flotante

Es aquella que puede ser retenida en una malla de entre 2.8 y 3 mm, la cual se acumula en la superficie y es altamente visible. En general se encuentran dos tipos de materia flotante: partículas de materia y, componentes líquidos capaces de esparcirse como una fina película sobre grandes áreas de agua (Tomasini Ortiz, 2004).

2.1.1.6 Sólidos

De acuerdo con Metcalf & Eddy INC., 1995, los sólidos son el residuo que permanece en una cápsula después de evaporar y secar una muestra a una temperatura de 105 °C. Algunos ejemplos de partículas presentes en el agua residual se ilustran en la **Figura 3**. Los cuales, de acuerdo con el autor, estos pueden clasificarse de la siguiente manera:

- **Sólidos sedimentables:** Se definen como aquellos sólidos que sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica (cono de Imhoff) en el transcurso de un periodo de 60 minutos por acción de la gravedad. Este tipo de sólidos constituyen una medida aproximada de la cantidad de lodos que se obtendrán en la sedimentación primaria del agua residual.
- **Sólidos suspendidos o sólidos no filtrables:** Es el material constituido por los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos y coloidales que son retenidos por un filtro de fibra de vidrio con poro de 1.5 μm , secado y llevado a masa constante, a una temperatura de 105 °C.
- **Sólidos disueltos o sólidos filtrables:** Corresponde a los sólidos coloidales y disueltos. La fracción coloidal está compuesta por las partículas de materia de tamaños entre 0.001 y 1 μm . En tanto que, los sólidos disueltos están compuestos de moléculas orgánicas e inorgánicas e iones en disolución en el agua de tamaños menores a 0.001 μm . Son determinados experimentalmente o por diferencia de los sólidos totales y los suspendidos.
- **Sólidos volátiles y sólidos fijos:** Cada una de las categorías comentadas, pueden ser divididas en función de su volatilidad a 550 ± 50 °C. A esta temperatura la fracción orgánica se oxidará y desaparecerá en forma de gas, quedando la fracción inorgánica en forma de cenizas de ahí los términos “volátiles” y “fijos”. El análisis de sólidos volátiles se emplea habitualmente para determinar la estabilidad biológica de lodos en aguas residuales.

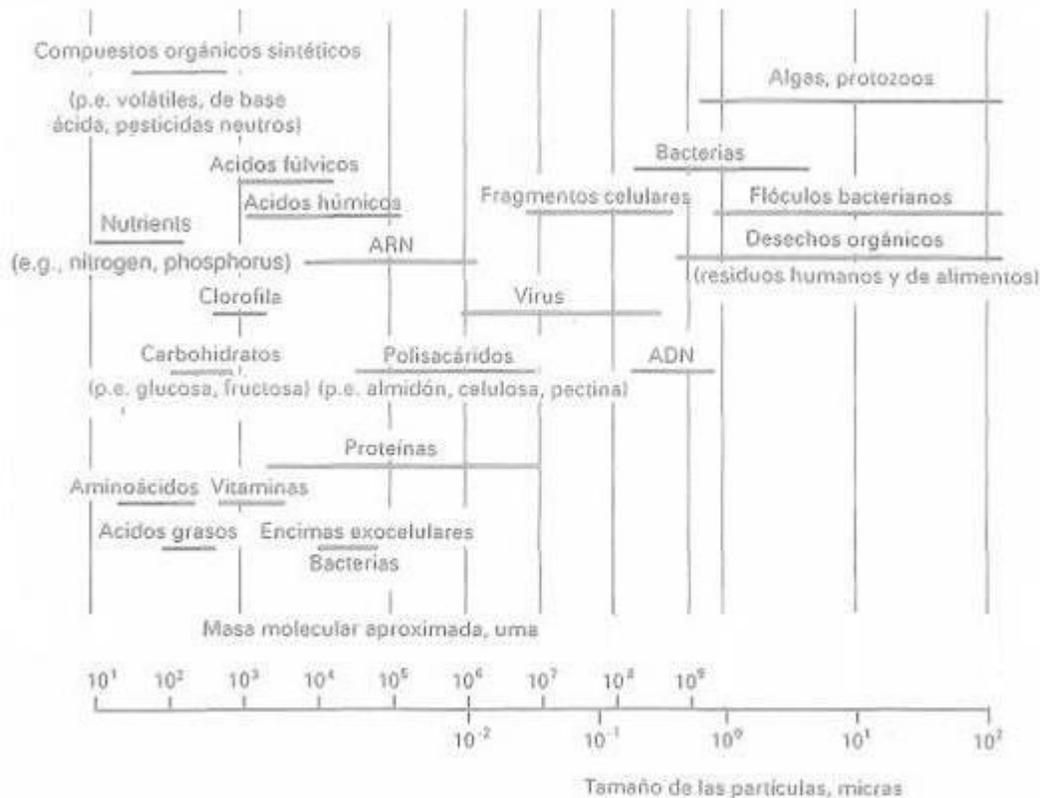


Figura 3 Intervalos de los contaminantes presentes en agua residual (Levine, et al., 1985)

2.1.1.7 Grasas y aceites

Son todas aquellas sustancias de naturaleza lipídica, que al ser inmiscibles con el agua, van a permanecer en la superficie dando lugar a la aparición de natas y espumas, esto entorpece cualquier tipo de tratamiento físico o químico, ya que no permiten el libre paso del oxígeno hacia el agua, ni la salida del CO_2 del agua hacia la atmósfera, por lo tanto, deben eliminarse en los primeros pasos del tratamiento del agua residual (Toapanta Vera, 2007).

2.1.2 Características químicas

Las características químicas contempladas en este proyecto incluyen: alcalinidad, pH, dureza, nitrógeno y sus formas, fósforo, azufre, fenoles, SAAM, oxígeno disuelto, DBO_5 y DQO. Cabe mencionar que dadas las características productivas de la planta y los procesos que en ella se llevan a cabo no se incluyeron parámetros de contaminación como metales pesados y compuestos BTEX, por no encontrarse presentes en sus operaciones.

2.1.2.1 Alcalinidad

Puede definirse como la capacidad del agua para neutralizar ácidos, de reaccionar con iones hidrógeno, para aceptar protones, así como la medida total de sustancias alcalinas (Romero Rojas, 2000).

La alcalinidad de un agua residual está provocada por la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, el magnesio, el sodio, el potasio o el amoníaco. Es así que, la concentración de alcalinidad en un agua residual es importante en aquellos casos en los que se empleen tratamientos químicos, en la eliminación biológica de nutrientes y cuando haya que eliminar el amoníaco mediante arrastre por aire (Metcalf & Eddy INC., 1995).

2.1.2.2 pH

La expresión usual para medir la concentración del ion hidrógeno en una solución. El pH controla muchas reacciones químicas y la actividad biológica normalmente se restringe a una escala bastante estrecha de pH entre 6.5 y 8.5 Las aguas muy ácidas o muy alcalinas son indeseables debido a que son corrosivas o presentan dificultades en su tratamiento (Huescas, 2013).

2.1.2.3 Dureza

La dureza del agua se define como la concentración de todos los cationes metálicos no alcalinos presentes (iones de calcio, estroncio, bario y magnesio en forma de carbonatos o bicarbonatos) y se expresa en equivalentes de carbonato de calcio y constituye un parámetro muy significativo en la calidad del agua, ya que afecta la capacidad de formación de espuma de detergentes en contacto con agua y representa una serie de problemas de incrustación en equipo industrial y doméstico (UDLAP, 2005).

2.1.2.4 Nitrógeno

De acuerdo con Metcalf & Eddy INC., 1995 existen cuatro formas principales de nitrógeno:

- **Nitrógeno orgánico:** es el nitrógeno que está presente asociado a moléculas como las proteínas, los ácidos nucleicos o metabolitos finales como la urea y el ácido úrico durante la descarga un agua residual cruda o residuos sólidos.
- **Nitrógeno amoniacal:** se encuentra en solución acuosa, bien en forma de ion amonio a pH ácido o como amoníaco a pH alcalino, de acuerdo con la siguiente ecuación de equilibrio:



- **Nitritos:** cuando el nitrógeno amoniacal es oxidado por bacterias da origen al nitrito. Irónicamente, el nitrito en sí es una especie química cuya toxicidad aguda es incluso peor que la del amoníaco, sin embargo, este no se volatiliza y se oxida por bacterias rápidamente

a nitrato. Aunque los nitritos se oxidan por adición de cloro, ello implica el aumento de la cantidad de cloro a dosificar y del coste de la desinfección.

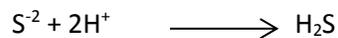
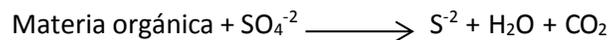
- **Nitratos:** es la forma más oxidada del nitrógeno que se puede encontrar en las aguas residuales, puede ser asimilado por plantas y algas o puede ser transformado en gas nitrógeno que regresa a la atmósfera, en este último caso, las bacterias desnitrificantes pueden reducirlo a nitrito y luego metabolizarlo a gas nitrógeno, aunque para ello requieren condiciones anaerobias.

2.1.2.5 Fósforo

Otro componente del agua residual importante es el fósforo, el cual es un elemento esencial para el crecimiento biológico. En el agua residual el fósforo se encuentra en tres formas: ortofosfatos solubles, polifosfatos inorgánicos y fosfatos orgánicos. El ortofosfato es la forma más fácilmente asimilable por los microorganismos y se utiliza como un parámetro de control en los procesos biológicos de eliminación de fósforo (Universidad de Salamanca, 2003).

2.1.2.6 Azufre

El azufre es un elemento requerido para la síntesis de proteínas y se libera cuando estas se descomponen. Prácticamente todos los microorganismos pueden utilizar el sulfato como fuente de azufre. Las bacterias pueden realizar la reducción de sulfatos a sulfuros y a sulfuros de hidrógeno en condiciones anaerobias. A continuación, se muestran las reacciones generales típicas que rigen estos procesos (Universidad de Salamanca, 2003).



2.1.2.7 Fenoles

Los fenoles, definidos como hidroxiderivados del benceno y sus núcleos condensados, pueden estar presentes en las aguas residuales domésticas e industriales (desinfectantes, fungicidas, germicidas y conservadores), en las aguas naturales y en los suministros de agua potable (SCFI, 2001).

2.1.2.8 Sustancias Activas al Azul de Metileno

Los agentes tensoactivos, también conocidos como Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM), están formados por moléculas de gran tamaño y ligeramente solubles en agua, los cuales son responsables de la aparición de espumas que tienden a concentrarse en la interface aire-agua, especialmente durante la aireación del agua residual (Metcalf & Eddy INC., 1995).

Los productos tensoactivos entran en las aguas residuales principalmente por la descarga de residuos de lavado doméstico de ropa u otras operaciones de limpieza. El uso de que tensoactivos como materia prima en la industria se debe a que estos sirven como coadyuvantes para diversos

productos, debido a que la disminución de la tensión superficial provocada por estos agentes facilita la distribución y penetración de los principios activos del producto.

2.1.2.9 Oxígeno disuelto

Las aguas no contaminadas suelen estar bien oxigenadas (7-8 mg/L de O₂) sin embargo ésta cantidad disminuye significativamente a mayor presencia de residuos. Si bien es conveniente la riqueza en oxígeno para evitar fenómenos de anaerobiosis en la red de distribución, por el contrario, una alta tasa de O₂ en tuberías puede contribuir a fenómenos de corrosión de materiales metálicos, que sirven a su vez de mecanismo de retroalimentación para el desarrollo de bacterias de Fe y de Mn, las cuales pueden provocar efectos de coloración y turbidez en el agua (UJAEN, 2007).

2.1.2.10 Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), indica la cantidad de oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica durante los 5 días que dura el ensayo. Los resultados de los ensayos de DBO se emplean para: 1) determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente; 2) dimensionar las instalaciones de tratamiento de aguas residuales; 3) medir la eficacia de algunos procesos de tratamiento, y controlar el cumplimiento de las limitaciones a que están sujetos los vertidos (Metcalf & Eddy INC., 1995).

2.1.2.11 Demanda química de oxígeno (DQO)

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es la cantidad de oxígeno consumido por las materias existentes en el agua, que son oxidables en condiciones operatorias definidas. La medida corresponde a una estimación de las materias oxidables presentes en el agua, ya sea su origen orgánico o inorgánico (Fernández & Curt, 2005).

Determinar la DQO y su correspondiente DBO₅ de un efluente de aguas residuales permite establecer una relación que indica su biodegradabilidad. Por tanto, cuando la relación DQO/DBO₅ es menor a 2.5 se trata de un efluente o compuesto biodegradable, pudiéndose utilizar sistemas biológicos como fangos activos o lechos bacterianos. Cuando dicha relación es mayor a 2.5 y menor a 5 es biodegradable siendo recomendable el empleo de lechos bacterianos (Hernandez, 1992).

2.1.3 Características microbiológicas

El agua contiene suficientes sustancias nutritivas para permitir el desarrollo de diferentes microorganismos, los cuales provienen del contacto con el aire, el suelo, animales o plantas vivas o en descomposición, fuentes minerales y materia fecal (Romero Rojas, 2000).

Algunos de los parámetros que determinan la contaminación microbiológica en agua incluyen organismos coliformes totales, coliformes fecales y huevos de helminto.

2.1.3.1 Organismos coliformes totales

El término abarca bacterias de tipo bacilos (cualquier bacteria en forma de bastoncillo) Gram negativos que crecen en presencia de sales biliares o de otros compuestos con propiedades similares de inhibición y que fermentan lactosa a 35-37 °C produciendo ácido, gas y aldehído en un plazo de entre 24 y 48 horas (CONAGUA, 2016). Sin embargo, dado que ciertas clases de bacterias pueden crecer en el suelo, la presencia de coliformes no siempre es sinónimo de contaminación con residuos humanos (Metcalf & Eddy INC., 1995).

2.1.3.2 Organismos coliformes fecales

Los coliformes fecales son todos los bacilos cortos que difieren del grupo de coliformes totales por su capacidad para crecer a una temperatura entre 44 y 45°C, abarca los géneros *Escherichia* y parte de algunas especies *Klebsiella*, *Enterobacter* y *Citrobacter*. De ellos, *E.coli* es específicamente de origen fecal y se encuentra siempre presente en las heces de humanos, otros mamíferos y gran número de aves. Por ello, desde el punto de vista de la salud, el grupo coliforme fecal es mucho más útil que el total (CONAGUA, 2016).

2.1.3.3 Huevos de helminto

Aunque los parásitos de Helminto no son estudiados generalmente por los microbiólogos, su presencia en aguas residuales es de gran preocupación con respecto a la salud humana. El huevo constituye la etapa contagiosa de los parásitos de Helminto, los cuales son excretados en las heces y se extienden a las aguas residuales (Bitton, 1994). El huevo es muy resistente a las tensiones ambientales y a la desinfección con cloro en la planta de tratamiento de aguas residuales, aunque algunos huevos pueden ser removidos mediante procesos convencionales de tratamiento como sedimentación, filtración y lagunas de estabilización (Lambert, 1975).

2.2 Sistemas de tratamiento de aguas residuales

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales tienen el objetivo de depurar las aguas antes de su vertido o reutilización. En estos sistemas, los contaminantes son eliminados o removidos mediante la aplicación de uno o más fenómenos de tipo:

- Físico (operaciones unitarias de separación física)
- Químico (procesos unitarios de transformación química)
- Biológico (procesos unitarios de transformación bioquímica)

En la **Tabla 2** se ejemplifican los contaminantes comúnmente presentes en el agua residual y los procesos que se suelen emplear en su remoción, de los cuales se hablará en las siguientes secciones.

Tabla 2 Operaciones, procesos para remover los principales contaminantes del agua residual

Contaminantes	Unidad, proceso o sistema de tratamiento	Clasificación
Sólidos suspendidos	Cribado y desmenuzado	Físico
	Sedimentación	Físico
	Flotación	Físico
	Filtración	Físico
	Coagulación-floculación	Químico
Grasas y aceites	Flotación	Físico
pH ácido o alcalino	Neutralización directa con hidróxido de sodio o ácido sulfúrico	Químico
	Homogeneización	Físico
Biológicos biodegradables	Lodos activados	Biológico
	Filtro percolador	Biológico
	Discos biológicos rotatorios	Biológico
	Lagunas airadas	Biológico
	Lagunas de oxidación	Físico-Biológico
	Filtración en arena	Físico-Químico
Patógenos	Cloración	Químico
	Ozonación	Químico
	Luz UV	Físico
Nitrógeno	Nitrificación y desnitrificación con biomasa suspendida	Biológico
	Nitrificación y desnitrificación con biomasa fija	Biológico
	Arrastre con amoníaco	Físico-Químico

Contaminantes	Unidad, proceso o sistema de tratamiento	Clasificación
	Intercambio iónico	Químico
	Cloración en el punto de quiebre	Químico
Fósforo	Coagulación/sedimentación con sales metálicas	Físico-Químico
	Coagulación/sedimentación con cal	Físico-Químico
	Remoción bioquímica	Bioquímico
Orgánicos refractarios	Adsorción con carbón activado	Físico
	Ozonación	Químico
Metales pesados	Precipitación química	Químico
	Intercambio iónico	Químico
Sólidos inorgánicos disueltos	Intercambio iónico	Químico
	Ósmosis inversa	Físico
	Electrodialisis	Químico

(IMTA, 1996; Eckenfelder, 1970)

2.2.1 Tratamientos físicos

En los tratamientos físicos se producen cambios en la composición del agua residual a través de la aplicación de fuerzas físicas. Entre operaciones típicas están: 1) desbaste; 2) homogeneización; 3) flotación; 4) sedimentación y 5) filtración.

2.2.1.1 Desbaste

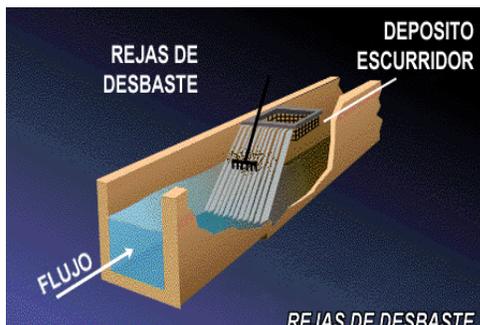


Figura 4 Diseño de rejillas de desbaste (CIDTA, 1999)

Como se visualiza en la **Figura 4**, las rejillas de desbaste se emplean para la reducción de sólidos en suspensión de tamaños distintos aunque en algunos casos se utilizan trituradoras.

De acuerdo con Ramalho, 1996 éstas se suelen clasificar en rejillas de finos y gruesos, sea de limpieza manual o mecánica. Para su diseño es importante considerar el equipo a utilizar, las dimensiones del canal de la reja, el

intervalo de variación del caudal, la separación de barras y la velocidad de paso.

2.2.1.2 Homogeneización

La variabilidad de las condiciones del afluente es un factor frecuente en los sistemas de tratamiento. Por lo tanto, las unidades de proceso deben tener suficiente capacidad tanto para absorber y amortiguar estas variaciones de manera satisfactoria (Water Pollution Control Federation, 1988).

A través de las unidades de homogeneización similares a las de la **Figura 5** es posible conseguir un caudal constante o casi constante, otras de sus ventajas de acuerdo con Rushton, 1952 son:



Figura 5 Ejemplo de tanque de homogeneización (Aguamarket, 2019)

-Mejora el tratamiento biológico, ya que eliminan o reduce las cargas de choque, se diluyen las sustancias inhibitoras, y se consigue estabilizar el pH.

-Mejora la calidad del efluente y del rendimiento de los tanques de sedimentación al trabajar con cargas de sólidos constantes.

-Reduce las superficies necesarias para la filtración del efluente, mejora de los rendimientos de los filtros y posibilidad de conseguir ciclos de lavado más uniformes.

-En el tratamiento químico, el amortiguamiento de las cargas mejora el control de la dosificación

de los reactivos y la fiabilidad del proceso.

El volumen requerido del tanque de homogeneización se determina a partir de un gráfico de caudales a tratar, en el que se representa las aportaciones acumuladas a lo largo del día. En la práctica, es recomendable que el volumen de tanque sea superior al determinado por consideraciones teóricas (EPA, 1974).

2.2.1.3 Flotación

La flotación es una operación física que consiste en generar pequeñas burbujas de gas (aire), que se asociarán con las partículas presentes en el agua (cuya densidad es inferior o muy parecida), así como emulsiones (grasas y aceites) para ser elevadas hasta la superficie, de donde son arrastradas y sacadas del sistema, mientras que el líquido clarificado puede separarse cerca del fondo y parte del mismo puede reciclarse (Rodríguez Fernandez-Alba, et al., 2006).

La flotación consta de varias etapas para que el proceso se lleva a cabo: 1) generación y distribución de microburbujas en el agua por tratar; 2) colisión entre las microburbujas y las partículas suspendidas en el agua; 3) contacto interfacial del sistema partícula/burbuja; 4) arrastre de otras partículas que se encuentran en la trayectoria de los aglomerados que ya se han formado y 5)

ascenso del aglomerado a la superficie, de donde debe removerse. (Ramalho, 1996; Sander, et al., 1994; Strickland , 1980).

La uniformidad y continuidad del proceso están ligadas al diámetro de burbujas colocadas en la fase líquida. Burbujas de diámetros menores a 100 μm tienen velocidad de ascenso de algunos milímetros por segundo, mientras que burbujas de algunos milímetros de diámetro (2 a 9 mm) tienen velocidades 10 a 30 veces superiores (Forero, et al., 1999).

De acuerdo con Rodríguez Fernandez-Alba, et al., 2006 existen diferentes métodos de flotación, en función de cómo se introduzca en el líquido, se dividen en dos: flotación por aire disuelto y flotación por aire inducido.

Flotación por aire disuelto (FAD): Tal como se muestra en la **Figura 6** el aire se introduce en el agua residual bajo una presión de varias atmósferas para conseguir la saturación en aire del agua. A continuación, se libera la presión hasta alcanzar la atmosférica, liberándose el aire disuelto en forma de microburbujas.

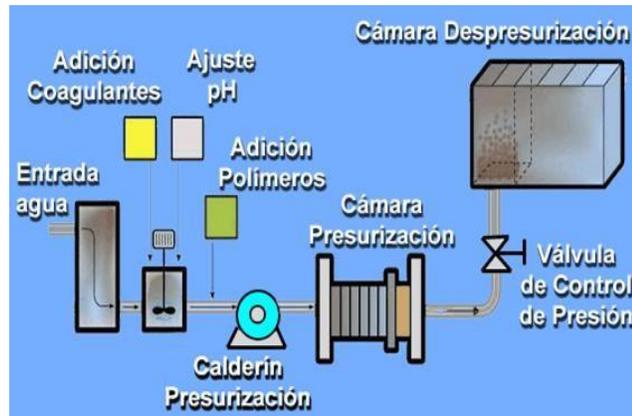


Figura 6 Esquema de un sistema de flotación por aire disuelto (CIDTA, 2004)

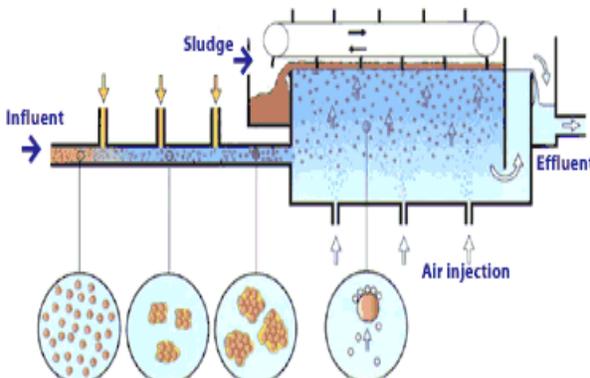


Figura 7 Esquema de un sistema de flotación por aire inducido (El agua potable, 2019)

Flotación por aire inducido: La operación es similar al caso anterior, pero la generación de burbujas se realiza a través de difusores de aire, normalmente situados en la parte inferior del equipo de flotación, o bien inducidas por rotores o agitadores **Figura 7**. En este caso, el tamaño de las burbujas inducidas es mayor.

En ambos casos, se busca alcanzar una alta generación de microburbujas dentro del rango de tamaños efectivos para el proceso y distribuirlas eficientemente (Forero, et al.,

1999).

2.2.1.4 Sedimentación

La sedimentación consiste en la separación, por la acción de la gravedad de partículas cuyo peso específico es mayor que el del agua y no pueden retenerse en las unidades de pretratamiento, por su finura o densidad, ni pueden separarse por flotación (CIDTA, 2004).

A menudo se utilizan para designar la sedimentación los términos de clarificación y espesamiento. Se habla de clarificación cuando hay un especial interés en el fluido clarificado y de espesamiento cuando el interés está puesto en la suspensión concentrada.

De acuerdo con Ramalho, 1996 y Muñoz Cruz, 2008 existen cuatro tipos de sedimentación de acuerdo con su concentración y tendencia a la interacción de las partículas, las cuales se ilustran en la **Figura 8** y se describen a continuación.

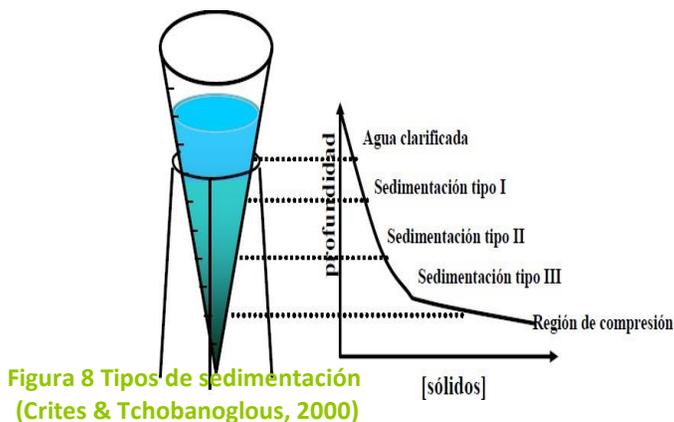


Figura 8 Tipos de sedimentación
(Crites & Tchobanoglous, 2000)

Sedimentación tipo I o de partículas discretas, las partículas que se depositan mantienen su individualidad, o sea, no se somete a un proceso de coalescencia con otras partículas. En este caso, las propiedades físicas de las partículas (tamaño, forma, peso específico) no cambian durante el proceso. La deposición de partículas de arena en los desarenadores es un ejemplo típico.

Sedimentación tipo II o floculenta, tiene lugar cuando la aglomeración de las partículas va

acompañada de cambios en la densidad y en la velocidad de sedimentación o precipitación. Las trayectorias de sedimentación de las partículas tienen forma curva, en lugar de las líneas rectas que se producen en la sedimentación de partículas discretas. Este tipo de sedimentación se produce, generalmente, en los tanques de decantación primaria, en las zonas superiores de los decantadores secundarios y en los tanques de sedimentación química.

Sedimentación tipo III o zonal, las partículas que sedimentan sufren interacciones entre sí, de tal forma que la posición de una partícula respecto a otra permanece prácticamente constante, sedimentando todas las partículas como una zona o unidad. Este tipo de sedimentación se produce generalmente en los tanques de decantación secundaria, posteriores al tratamiento biológico, así como en los tanques de sedimentación de la precipitación química.

Sedimentación tipo IV o por compresión, implica la formación de una estructura de partículas sedimentadas. La compresión es debida al peso de las partículas que van sedimentando desde la superficie hacia el fondo del estanque de sedimentación. Cuanto mayor sea la compresión menor será el volumen de fangos que se obtengan tal como lo ilustra la **Figura 9**. Este tipo de sedimentación se produce mayoritariamente en los tanques de sedimentación procedentes de la precipitación química y en los de proceso secundario.

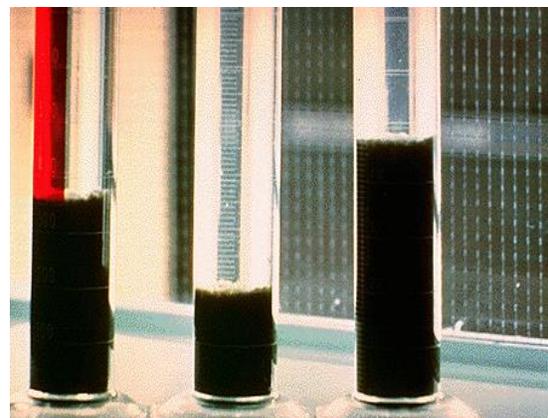


Figura 9 Sedimentación por compresión
(CIDTA, 1998)

2.2.1.5 Filtración

La filtración es una operación en la que se hace pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión.

De acuerdo con Rodríguez Fernández-Alba, et al., 2006, los sistemas de filtración se pueden clasificar en filtros por gravedad y presurizados:

Filtración por gravedad: el agua circula verticalmente y en descenso a través del filtro por simple gravedad como se muestra en la **Figura 10**. Dentro de este tipo, podemos hablar de dos formas de operar, que nos lleva a tener una filtración lenta, apenas utilizados actualmente, o una filtración rápida. El mecanismo de la separación de sólidos es una combinación de asentamiento, retención, adhesión y atracción, por lo que se eliminan partículas mucho menores que el espacio intersticial.

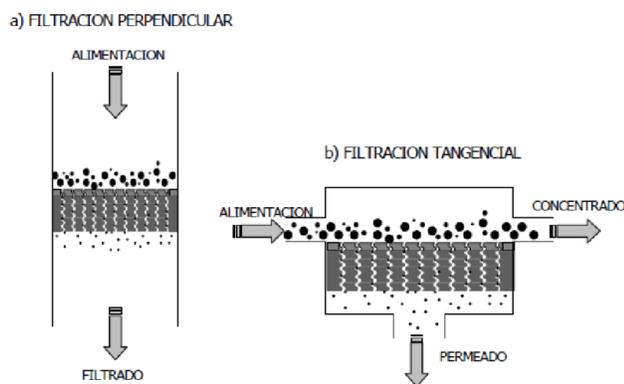


Figura 10 Esquema de filtración por gravedad (Saavedra & Romero, 1999)

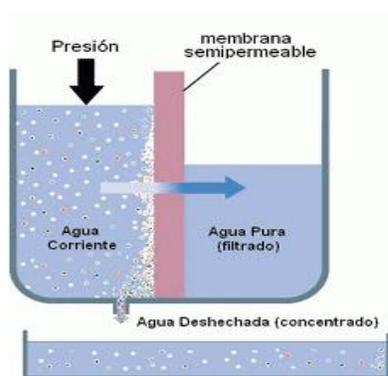


Figura 11 Esquema de filtración a presión (CanariAqua, 2013)

Filtración presurizada: el agua se ve forzada a atravesar el medio filtrante a presión, tal como ejemplifica en la **Figura 11**. También en este caso puede haber filtración lenta, en la que en la superficie del filtro se desarrolla una torta filtrante donde la filtración, a través de esa superficie, es por mecanismos físicos y biológicos. Por otro lado, en la filtración rápida se habla de filtración en profundidad, es decir, cuando la mayor parte de espesor de medio filtrante está activo para el proceso de filtración y la calidad del filtrado mejora con la profundidad.

2.2.2 Tratamientos químicos

Los tratamientos químicos son aquellos procesos en donde los contaminantes son eliminados mediante reacciones químicas. Los principales procesos químicos utilizados en el tratamiento de aguas residuales incluyen: 1) neutralización; 2) coagulación-floculación; 3) precipitación; 4) oxidación química y 5) desinfección.

2.2.2.1 Neutralización

Es la eliminación del exceso de acidez o alcalinidad mediante un químico de la composición opuesta (Metcalf & Eddy INC., 1995). En general, todas las aguas residuales tratadas con un pH

excesivamente alto o bajo requerirán una neutralización antes de que puedan ser transferidas al ambiente o antes del tratamiento químico o biológico, aunque en este último caso el proceso biológico en sí mismo proporciona una neutralización y una capacidad amortiguadora como resultado de la producción de CO₂ (Eckenfelder, 1970).

Los métodos comúnmente empleados para la neutralización directa de aguas residuales ácidas son: 1) lechos de caliza; 2) neutralización por cal; 3) neutralización por sosa cáustica (NaOH); 4) neutralización por carbonato de sodio, y 5) neutralización por amoníaco. En cuanto a la neutralización directa de aguas residuales alcalinas, las consideraciones económicas limitan la elección a ácidos como 1) el ácido sulfúrico y 2) ácido clorhídrico (Ramalho, 1996).

2.2.2.2 Coagulación-floculación

La coagulación se emplea para la eliminación de partículas dentro del rango de tamaño de 0.001 y 1 µm. Dado que tales impurezas presentan una carga superficial negativa que las hace estables e impide que se aproximen unas a otras, la coagulación es, por definición, el fenómeno de desestabilización de las partículas coloidales por medio de la neutralización de sus cargas eléctricas (Barrenechea Martel, 2005).

Habitualmente se utilizan sales con cationes de alta relación carga/masa (Fe³⁺, Al³⁺) junto con polielectrolitos orgánicos cuyo objetivo es favorecer la floculación, algunas de sus características se muestran en la **Tabla 3**. Sin embargo, no hay reglas generales en cuanto a qué coagulante es más eficaz, por lo que es necesario hacer un “ensayo de jarras” (jar test), en donde se analiza la eficacia de los distintos productos (o mezclas de los mismos) así como el pH y dosificación óptima para cada caso en particular (Rodríguez Fernandez-Alba, et al., 2006).

Tabla 3 Características de algunos reactivos coagulantes

Coagulante	Dosis (mg/L)	pH óptimo	Aplicaciones
Cal	150-500	9-11	Eliminación de coloides (1)
Al ₂ (SO ₄) ₃	75-250	4.5-7	Eliminación de coloides (1)
FeCl ₃	35-150	4-7	Eliminación de coloides (2)
FeCl ₂	70-200	4-7	
FeSO ₄ -7H ₂ O			
Polímero catiónico	2-5		Eliminación de coloides (3)
Polímero aniónico y no iónico		0.25-1.0	Ayudante de floculación y sedimentación

- (1) Eliminación de coloides y fósforo. Agua con baja alcalinidad y alta concentración de fósforo
- (2) Eliminación de coloides y fósforo. Agua con alta alcalinidad y baja concentración de fósforo
- (3) Eliminación de coloides. Ayudante con coagulantes metálicos

Fuente (Rodríguez Fernandez-Alba, et al., 2006)

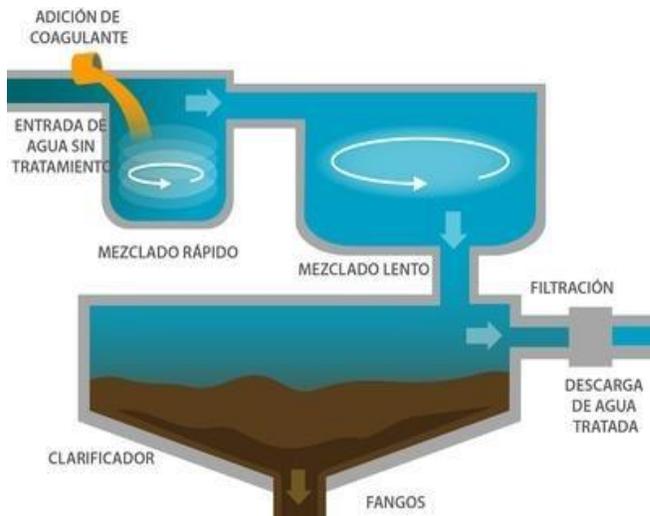


Figura 12 Esquema general del proceso coagulación-floculación (Koshland Science Museum, 1999)

Tal como lo muestra la **Figura 12**, los equipos en los que se lleva a cabo este proceso, suelen constar de dos partes bien diferenciadas: 1) adición de los reactivos, aquí el agua se somete a una fuerte agitación y durante un corto periodo de tiempo; 2) agitación lenta y donde el agua permanece más tiempo a fin de que se produzca la floculación, es decir que las partículas coloidales descargadas eléctricamente choquen entre sí, se aglomeren y formen otras mayores para su posterior sedimentación y eliminación mecánica (Rodríguez Fernandez-Alba, et al., 2006).

Otra forma de llevar a cabo el proceso es por medio de la electrocoagulación. Consiste en la formación de los reactivos *in situ* mediante la utilización de una célula electrolítica. El ánodo suele ser de aluminio, formándose cationes de Al^{3+} , mientras en el cátodo se genera H_2 , siendo útil si la separación posterior de la materia es por flotación (Khemis, et al., 2005).

2.2.2.3 Oxidación química

Las aguas residuales industriales o las aguas subterráneas contaminadas contienen con frecuencia sustancias recalcitrantes, tóxicas o no-biodegradables, las cuales se pueden oxidar químicamente, logrando así su eliminación (Gunt, 2010).

Actualmente se dispone una amplia gama de procesos de oxidación avanzada (Lenntech, 2010):

- Procesos de oxidación química usando peróxido de hidrógeno, ozono, peróxido y ozono combinados, hipoclorito, re agente Fenton, etc.
- Elevación de la oxidación ultra violeta tanto como UV/ozono, UV/Peróxido de hidrógeno, UV/aire.
- Oxidación del aire húmedo y oxidación catalítica del aire húmedo (donde el aire es usado como oxidante).

Entre las ventajas de estos procesos destacan (AINIA, 2012):

- Puede alcanzarse la mineralización total de los contaminantes orgánicos.

- Usualmente no generan lodos que requieren tratamiento y/o eliminación.
- Son muy útiles para eliminar contaminantes refractarios que resisten otros métodos de tratamiento, principalmente el biológico.
- Sirven para tratar contaminantes a muy baja concentración.
- Se usan para disminuir la toxicidad de los efluentes.

Sin embargo, los procesos de oxidación avanzada a menudo tienen un capital y unos costos operacionales altos comparados con el tratamiento biológico.

2.2.2.4 Desinfección

La desinfección persigue tres finalidades: producir agua libre de patógenos u organismos vivos, evitar la producción de subproductos indeseables de la desinfección y mantener la calidad bacteriológica en la red conducción posterior (Rodríguez Fernandez-Alba, et al., 2006).

Si bien la práctica muestra que los procesos de coagulación, sedimentación y filtración remueven el mayor porcentaje de microorganismos patógenos del agua, la eficiencia de los mismos no llega al 100% (Metcalf & Eddy INC., 1995).

Para llevar a cabo la desinfección se pueden utilizar distintos tratamientos: 1) tratamiento físico por medio de la radiación UV o calor y 2) tratamiento por agentes oxidantes, entre los que cabe destacar el clásico Cl_2 y algunos de sus derivados, o el ozono. En la **Tabla 4** se muestra una comparación de los principales métodos de desinfección del agua.

Cabe destacar que, al aplicar un medio o agente de desinfección, se deben tener en cuenta los siguientes factores: 1) tiempo de contacto; 2) tipo y concentración del agente químico; 3) intensidad y naturaleza del agente físico; 4) temperatura; 5) número de organismos; 6) tipo de organismos, y 7) naturaleza del medio líquido (Pelczar & Chan, 1986).

Tabla 4 Comparación de los principales métodos de desinfección del agua

Puntos de comparación	UV	Ozono	Cl_2 y derivados
Tiempo de contacto	1-10 s	10-20 min	30-50 min
Tiempo de reacción	Ninguno	Requerido	Requerido
Mantenimiento	Mínimo	Considerable	Promedio
Instalación	Sencilla	Elaborada	Elaborada
Influencia de: -materia suspendida	Fuerte	Fuerte	Fuerte

Puntos de comparación	UV	Ozono	Cl ₂ y derivados
-temperatura	Variable	Elevada	Elevada
-pH	Ninguna	Débil	Elevado
Residuos en el agua	Ninguna	Bajo	Presente
Influencia del agua	Ninguna	Presente	Presente
Corrosión	Ninguna	Presente	Presente
Toxicidad	Ninguna	Presente	Presente
Costos de operación	Bajo	Alto	Bajo

(Angehrn, 1986)

2.2.3 Tratamientos biológicos

Constituyen una serie de importantes procesos de tratamiento tanto para aguas residuales urbanas como en buena parte de aguas residuales industriales, en este caso se utilizan microorganismos (entre las que destacan las bacterias) para llevar a cabo la eliminación de componentes indeseables del agua, aprovechando la actividad metabólica de los mismos sobre esos componentes (Rodríguez Fernández-Alba, et al., 2006).

La aplicación tradicional consiste en la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto soluble como coloidal, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes (N y P), incluso en los últimos años se ha estudiado su capacidad para la remoción de sustancias tóxicas orgánicas e inorgánicas (Ramírez, 2004).

De manera general, el agua residual entra al reactor en el que se encuentra un cultivo de microorganismos, los cuales en su conjunto se les conoce como "licor mezclado" (Ramírez, 2004). Los microorganismos crecen utilizando los desechos orgánicos solubles que se introducen y los convierten en biomasa (microorganismos), dióxido de carbono y otros compuestos inocuos (Crites & Tchobanoglous, 2000).

La ecuación cinética se evalúa por medio de dos componentes: 1) Un parámetro de remoción total de sustrato, S, donde se supone refleja todos los compuestos orgánicos biodegradables medidos en términos de DBO₅ y 2) Un parámetro para estimar la biomasa del sistema, X, que se mide por medio del parámetro SSV (sólidos suspendidos volátiles), en este caso, la fracción volátil es proporcional a la actividad de la masa microbiana en cuestión (Ramírez, 2004).

Puesto que bacterias son los principales microorganismos que intervienen en la estabilización de los desechos orgánicos, es importante tomar en cuenta su ciclo de vida, el cual puede describirse en cuatro fases principales (Crites & Tchobanoglous, 2000):

- **Latencia:** representa el tiempo que requieren los microorganismos para aclimatarse y comenzar a dividirse.
- **Exponencial:** las células se dividen a cierta tasa determinada por su tiempo generacional y su habilidad para procesar alimento.
- **Fase estacionaria:** la población permanece posiblemente por la limitación en el sustrato o nutrientes necesarios para su crecimiento.
- **Muerte:** la mortalidad de las bacterias excede la producción de células nuevas.

Para asegurar que la población de organismos crezca, se debe permitir que permanezcan en el sistema el tiempo suficiente como para que se reproduzcan. Por lo tanto, el tiempo requerido se relaciona con su tasa de crecimiento (Crites & Tchobanoglous, 2000).

La velocidad de crecimiento depende de la cantidad de comida disponible para los microorganismos presentes. Esta relación crítica se llama relación alimento/microorganismos o F/M . En este caso, se considera la concentración de materia orgánica que entra al reactor, como DBO_5 y su relación con los microorganismos, medidos como sólidos suspendidos volátiles en el licor de mezcla del sistema (Ramírez, 2004).

Debido a que no todas las células del sistema se encuentran en la fase exponencial, se debe considerar la energía requerida para mantener las funciones vivas de los microorganismos, además de otros factores como la muerte y la depredación. En general, estos factores se agrupan y con frecuencia esta disminución se identifica en la literatura como *decaimiento endógeno* o K_d (Crites & Tchobanoglous, 2000).

De igual forma, se acepta que el coeficiente de conversión de sustrato (DBO_5) a biomasa (SSV) por parte de estos microorganismos es constante, por lo que recibe el nombre de Y o *coeficiente máximo de rendimiento* (Crites & Tchobanoglous, 2000).

En la **Tabla 5** se muestran los valores típicos de los anteriores coeficientes cinéticos utilizados en el diseño de sistemas de tratamiento biológicos. Es importante señalar que son expresiones empíricas y se usan con el propósito de ilustrar, además de que son las únicas expresiones disponibles (Crites & Tchobanoglous, 2000).

Tabla 5. Valores típicos de los coeficientes cinéticos para el proceso de lodos activados para aguas residuales domésticas

Coeficiente	Descripción	Base	Valor	
			Rango	Típico
Y	Coeficiente máximo de rendimiento	mg SSV/mg DQO	0.3-0.6	0.4
		mg SSV/mg DBO ₅	0.4-0.8	0.6
K _d	Coeficiente específico de velocidad de decaimiento endógeno	d ⁻¹	0.02-0.1	0.055
F/M	Relación alimento/microorganismo	g DBO ₅ /g SSVLM/día	.05-.20	0.1

(Grady C. & Lim, 1980)

En los procesos de oxidación de la materia orgánica, el metabolismo bacteriano juega un papel fundamental en cuanto al elemento aceptor de electrones. Este aspecto, además, tiene una importante incidencia en las posibilidades de aplicación al tratamiento de aguas. Atendiendo a cual es dicho aceptor de electrones distinguimos tres casos (Rodríguez Fernández-Alba, et al., 2006):

- **Sistemas aerobios:** La presencia de O₂ 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 CO₂ o parte de la propia materia orgánica, obteniéndose como producto de esta reducción el carbono en su estado más reducido, CH₄. La utilización de este sistema, tendría, como ya se explicará, como ventaja importante, la obtención de un gas combustible.
- **Sistemas anóxicos:** Se denominan así los sistemas en los que la ausencia de O₂ y la presencia de NO₃⁻ hacen que este último elemento sea el aceptor de electrones, transformándose, entre otros, en N₂, elemento completamente inerte. Por tanto, es posible, en ciertas condiciones, conseguir una eliminación biológica de nitratos (desnitrificación).

En el tratamiento biológico más conocido es quizás el de lodos activados. Como se muestra en la **Figura 13** este sistema necesita un sedimentador primario y un sedimentador secundario, del sedimentador secundario se recirculan los lodos generados allí hacia el reactor de lodos activados, esto con el fin de obtener la mayor eficiencia de remoción de contaminantes.

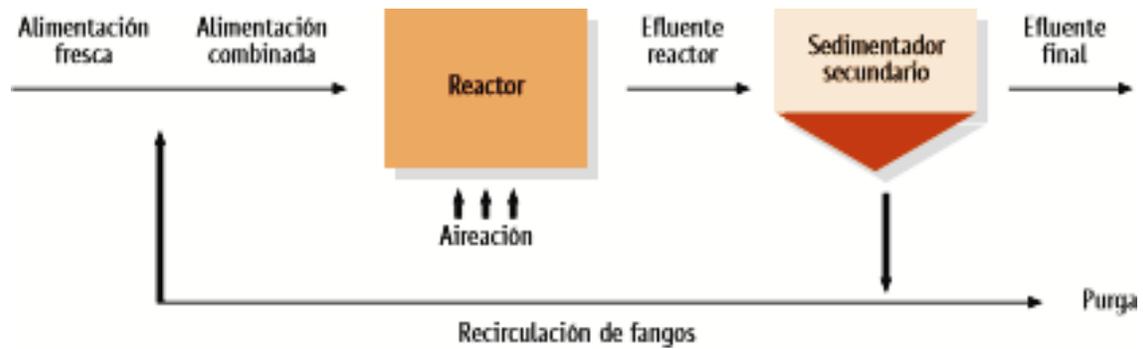


Figura 13 Esquema de un sistema convencional de lodos activados (Rodríguez Fernandez-Alba, et al., 2006)

Hoy en día existen diferentes variaciones en la forma de operar del sistema de lodos activados. Las principales, y que con mayor frecuencia se encuentran disponibles en el mercado son: 1) Los reactores discontinuos secuenciales (SBR); 2) los reactores biológicos de lecho móvil (MBBR) y 4) los sistemas de humedales artificiales. Mismos que se analizan con detenimiento en las siguientes secciones.

2.2.3.1 Reactores discontinuos secuenciales (SBR)

Un reactor discontinuo secuencial (SBR) se puede definir como un sistema de lodos activados, cuyo funcionamiento se basa en la secuencia de llenado y vaciado. En ambos sistemas intervienen la mezcla, reacción y sedimentación, sin embargo, en las plantas convencionales, los procesos se llevan a cabo simultáneamente en tanques separados, mientras que en un sistema SBR los procesos tienen lugar en el mismo tanque (Dautan, et al., 1988).

Tal como lo ilustra la **Figura 14**, los sistemas de reactores discontinuos tienen en común 4 etapas, las cuales se llevan a cabo en secuencia: 1) Etapa de llenado, para la adición de sustrato al reactor; 2) Etapa de reacción, en la cual el reactor se somete o no a aireación dependiendo de las necesidades del tratamiento; 3) Etapa de sedimentación que permite la separación de sólidos para lograr un sobrenadante clarificado como efluente; y 4) Etapa de vaciado, cuyo propósito es la extracción del agua clarificada del reactor (Cárdenas, et al., 2006).

En este tipo de reactores, es posible la eliminación de nutrientes mediante la introducción de una fase anaerobia que produce la liberación de fósforo por parte de los microorganismos; seguido de una fase aerobia en donde tiene lugar la nitrificación, consumo de oxígeno y de fósforo; mientras que la desnitrificación ocurre en una posterior fase anóxica (Von Sperling, 2007). Debido a que en la operación de un SBR el sustrato orgánico soluble es consumido por los microorganismos en la fase aerobia, se deben efectuar mediciones para asegurar suficiente sustrato orgánico soluble para la desnitrificación (Cárdenas, et al., 2006).

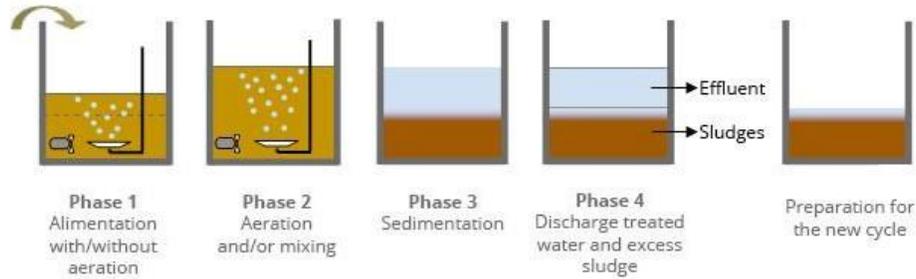


Figura 14 Esquema de un sistema SBR (Stacque, 2019)

La efectividad de un sistema SBR es comparable con los sistemas convencionales de lodos activados. Las ventajas más importantes son la de no requerir una bomba para el retorno de lodos y el sedimentador secundario es de menor tamaño, esto permite reducir los costos de inversión. Dentro de las desventajas se encuentra el riesgo de taponamiento en los dispositivos de aireación, esto afecta directamente el rendimiento del sistema e incluso podría ocasionar una suspensión del sistema (Huartos Toro, 2018).

2.2.3.2 Reactor Biológico de Lecho Móvil (MBBR)

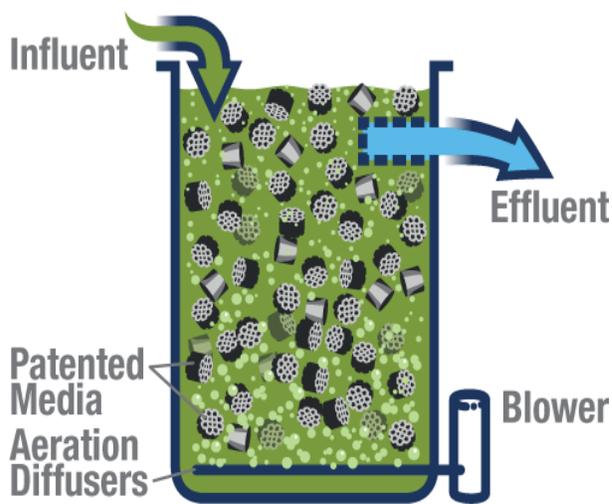


Figura 15 Esquema de un reactor biológico de lecho móvil (Nexom, 2019)

El principio básico del proceso de lecho móvil es el crecimiento de la biomasa en soportes plásticos que se mueven en el reactor biológico mediante la agitación generada por sistemas de aireación o por sistemas mecánicos. Los soportes son de material plástico con densidad próxima a $1\text{gr}/\text{cm}^3$ que les permite moverse fácilmente en el reactor incluso con porcentajes de llenado del 70%. (Larrea, 2004). Es conveniente que el soporte tenga una elevada superficie específica por unidad de volumen, para posibilitar el crecimiento de gran cantidad de biomasa y brindar una mayor efectividad (Hazen y Sawyer, 2011).

El medio dentro del reactor se mantiene en suspensión utilizando difusores de aire de burbuja fina o gruesa si el sistema es aeróbico o con mezcladores mecánicos si el sistema es anaerobio. Dentro de los procesos llevados a cabo en el MBBR no existe un retorno de lodos activados. La capacidad del reactor depende de la carga orgánica e hidráulica, la temperatura, la capacidad de transferencia de oxígeno y el grado de tratamiento requerido (CAR Cundinamarca, 2011).

Las ventajas de estos sistemas son la poca área requerida para su funcionamiento, menor producción de lodos y la ausencia de recirculación de fangos al reactor biológico. Entre sus

desventajas está el alto consumo energético en su etapa operacional, la posible necesidad de adicionar productos químicos al proceso y los altos costos de operación para la remoción de nutrientes (Huartos Toro, 2018).

2.2.3.3 Sistemas de humedales artificiales.

Estos sistemas se basan en los procesos biológicos, físicos y químicos que se desarrollan en el lento movimiento del agua a través de un medio filtrante y con la ayuda de plantas acuáticas, enraizadas en el mismo medio filtrante.

Principalmente están compuestos por (iAgua, 2012):

- **Un sustrato o material granular:** sirve de soporte a la vegetación y permite la fijación de la biopelícula bacteriana que interviene en la mayoría de los procesos de eliminación de contaminantes presentes en las aguas a tratar.
- **La vegetación:** principalmente compuesta por macrófitas emergentes que contribuyen a la oxigenación del sustrato a nivel de la rizósfera, a la eliminación de nutrientes por absorción/extracción y al desarrollo de la biopelícula bacteriana.
- **El agua a tratar:** circula a través del sustrato y la vegetación, la cual primeramente recibe un pretratamiento a fin de evitar la intrusión de sólidos de gran tamaño.

La remoción de contaminantes dentro de estos sistemas se da por medio de interacciones complejas de carácter fisicoquímico y microbiológico por ejemplo la biodegradación microbiana, la captación por las plantas, la adsorción en el lecho y la volatilización (Kadlec & Kinght, 1996).

De acuerdo con el portal iAgua, 2012 los humedales se pueden clasificar en humedales artificiales de flujo superficial y humedales artificiales de flujo subsuperficial, cuyas características principales se describen a continuación:

Humedales artificiales de flujo libre o superficial: el agua circula por encima del sustrato continuamente. Se favorecen las condiciones aerobias al estar el agua directamente expuesta a la atmósfera.

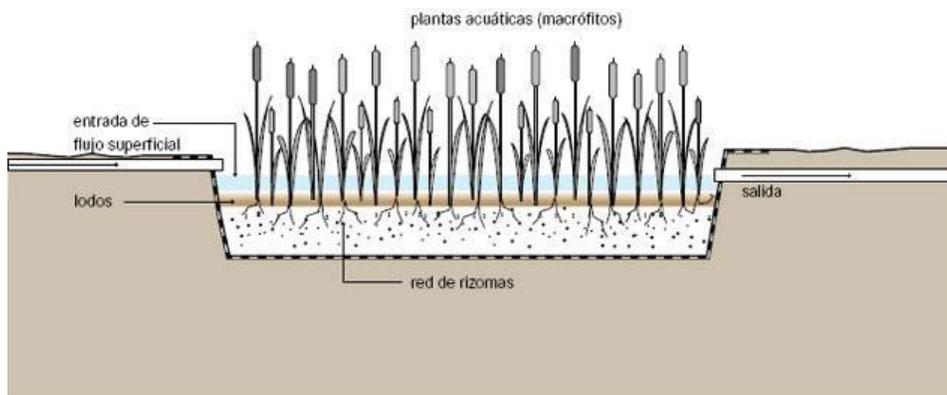


Figura 16 Esquema de humedal de flujo superficial (Alianza por el agua, 2016)

Humedales artificiales de flujo subsuperficial: el agua circula a través del sustrato. En función del sentido del flujo, pueden ser horizontales o verticales.

Vertical: el agua circula verticalmente a través del sustrato de manera intermitente. Se suelen incluir chimeneas de aireación para favorecer las condiciones aerobias. Se suelen desarrollar procesos de nitrificación, entre otros.

Horizontal: el agua circula horizontalmente a través del sustrato de manera continua. Se favorecen las condiciones anaerobias al mantenerse el nivel del agua por debajo del sustrato. Se suelen desarrollar procesos de desnitrificación, entre otros.

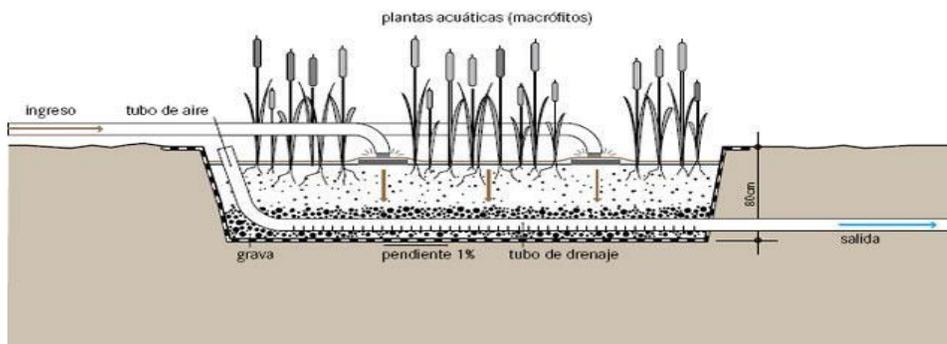


Figura 17 Esquema humedal artificial de flujo subsuperficial vertical (Alianza por el agua, 2016)

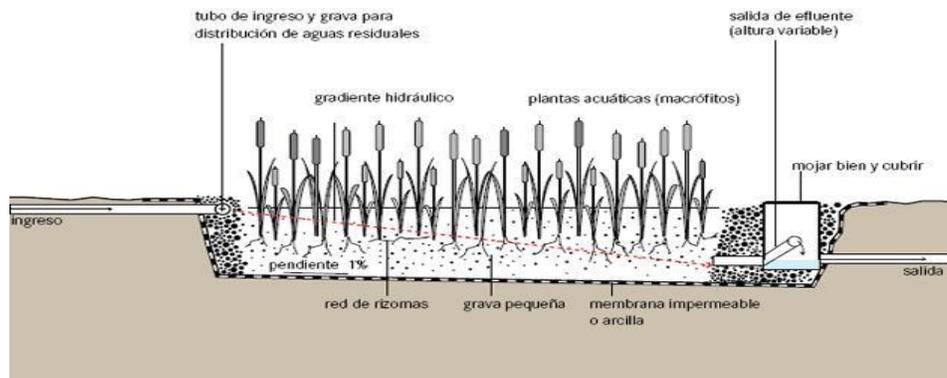


Figura 18 Esquema humedal de flujo subsuperficial horizontal (Alianza por el agua, 2016)

Entre sus ventajas principales destacan, su muy bajo costo de implementación y explotación, así como su buena integración paisajística, sin embargo, su desventaja principal es la necesidad de grandes superficies de terreno.

2.3 Lodos residuales

El subproducto más importante en el tratamiento de aguas residuales, tanto por su volumen, como por el tratamiento posterior que requieren, son los lodos o biosólidos, los cuales se dividen en dos tipos (Limón Macias, 2013):

- Los lodos primarios: se producen en la sedimentación primaria, en la cual se remueven sólidos sedimentables. La cantidad depende de la carga superficial o tiempo hidráulico de retención. En la sedimentación primaria con químicos se produce más lodo, producto de una mayor remoción y de la precipitación química de la materia coloidal.
- Los lodos secundarios: se producen en procesos de tratamiento biológicos que convierten residuos o sustratos solubles en biomasa. También incluyen la materia particulada que permanece en el agua después de la sedimentación primaria y que se incorpora en la biomasa. La cantidad producida depende de factores como la eficiencia del tratamiento primario, la relación de SST a DBO, la cantidad de sustrato soluble, la remoción de nutrientes y los criterios de diseño del tratamiento.

El volumen de lodo depende en su mayoría del contenido de humedad. Un lodo primario tiene del 91 al 95% de humedad, con un valor típico del 94%. En cambio, un lodo secundario, tiene del 98.5 al 99.5% de humedad, con un valor típico del 99.2% (Metcalf & Eddy INC., 1995).

Antes de poder aprovechar o disponer los lodos, éstos deben ser estabilizados para reducir la atracción de vectores, olores y riesgos a la salud. Además, los lodos deben ser desaguados para reducir su volumen (Limón Macias, 2013).

2.4 Criterios de selección de tratamiento

Las características del agua residual es una de las variables principales para la selección del proceso o la serie de procesos de tratamiento, ya que de ello dependerá el grado de tratamiento y la eficiencia esperada (Rodríguez Miranda, et al., 2015).

En la **Tabla 6** se observa la diferenciación entre las concentraciones (fuerte, media, débil/ligera) de las aguas residuales de acuerdo a lo señalado en la bibliografía especializada. Mientras que las eficiencias de remoción de las diferentes tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales pueden observarse en la **Tabla 7**.

Además de la caracterización del agua residual a tratar y eficiencia de los sistemas de tratamiento, es importante considerar otras variables como la calidad del efluente de salida requerido, los costos de instalación y mantenimiento, la disponibilidad de espacio, la consideración de futuras ampliaciones o la previsión de límites de calidad de vertido más estrictos, así como las características y necesidades particulares de la organización.

A fin de facilitar la selección del sistema de tratamiento, comúnmente se recurre a la toma de decisiones multicriterio. La cual consta de los siguientes pasos (Rodríguez Miranda, et al., 2015):

- Se definen los objetivos principales y secundarios del proyecto según el contexto y las necesidades de la organización.
- Se seleccionan criterios de evaluación.
- Se determinan las escalas de medición donde una puntuación de 5 significa sobresaliente, 3 suficiente y 1 deficiente.
- Se definen los pesos relativos de los criterios de evaluación.
- Se formula una matriz de evaluación.

2.5 Comentarios finales del capítulo

A partir de lo anterior se concluye que, para la correcta concepción, planificación, evaluación de proyecto, explotación y mantenimiento de los sistemas de tratamiento de agua residual, el profesional a cargo debe familiarizarse con los anteriores conceptos por lo que el presente capítulo pretende ser una aproximación para ello.

Tabla 6 Características típicas del agua residual

Parámetro	Unidad	Concentración (a)			Concentración (b)			Concentración (c)		
		Fuerte	Media	Débil	Cruda	Sedimentada	Tratada biológicamente	Fuerte	Media	Ligera
Sólidos totales	mg/L	1200	720	350	800	680	530	1000	500	200
SDT	mg/L	850	500	250				500	200	100
SST	mg/L	350	220	100	240	120	30	500	200	100
Sólidos sedimentables	mg/L	20	10	5				250	180	40
DBO ₅	mg/L	400	220	100	200	130	30	300	200	100
COT	mg/L	290	160	880						
DQO	mg/L	1000	500	250				800	450	160
N (total)	mg/L	85	40	20	35	25	20	86	50	25
N NH ₄	mg/L	50	25	12				50	30	15
N NO ₂	mg/L	0	0	0				0.1	0.05	0.001
N NO ₃	mg/L	0	0	0				0.4	0.2	0.1
N org	mg/L	35	15	8				35	20	10
P total	mg/L	20	10	6	10	8	7	17	7	2
P org	mg/L	5	3	1	7	7	7			
P inorg	mg/L	10	5	3						
Sulfatos	mg/L	50	30	20						
Cloruros	mg/L	100	50	30				175	100	15
Grasas y aceites	mg/L	150	100	50				40	20	5
Alcalinidad total	mg/L	200	100	50						
COV's	mg/L	400	400-100	100						
Coliformes totales	NMP/100 mL	10 ⁷ -10 ⁹	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁸ -10 ⁷						

a (Metcalf & Eddy INC., 1995); b (Hammer, 2012); c (Hernández, 1996)

Tabla 7 Eficiencias de remoción de contaminantes por tecnologías

Tecnología de tratamiento	Referencia	Eficiencia de remoción (%)								
		SST	DBO5	DQO	N NH3	N ORG	N NO3	N TOTAL	P TOTAL	COLIFORMES
Desarenador convencional	(RAS, 2000)	0-10	0-5	0-5						
	(Metcalf & Eddy INC., 1995)	0-10	0-5	0-5						
Sedimentador primario	(Metcalf & Eddy INC., 1995)	50-65	30-40	30-40		10-20			10-20	
	(Fair, 1968)	40-70	25-40	30-40						25-75
	(Yañez, 1995)	40-70	25-40							25-75
Tanque séptico	(Batalha, 1989)	50-70	40-62					<10	<10	<60
Tanque séptico filtro	(Von Spelling, 1996)		70-90					10-20	10-20	60-90
Primario avanzado	(Yañez, 1995)	70-90	50-86							40-80
	(Tsukamoto, 2002)	73-84	46-70					<10	10-20	80-90
UASB-lodo activado SBR	(Torres, 2000)	84-86	87-93					15-25	20-90	23-72
Reactor anaerobio de lecho fluidizado	(Rodríguez et al 2006)			80-85						
Lodo activado convencional	(RAS, 2000)	80-90	80-95	80-95			15-20		10-25	
	(Yañez, 1995)	85-98	70-98							95-98
	(Fair, 1968)	55-95	55-95	50-80						90-98
	(Von Spelling, 1996)	80-90	85-93					30-40	30-40	60-90
Lodo activado SBR	(Von Sperling, 2007)	80-90	85-95					30-40	30-40	60-90
Filtro percolador alta tasa	(Yañez, 1995)	70-90	60-85							90-95
	(Metcalf & Eddy INC., 1995)	60-85	65-80	60-80	8-15			15-30	8-12	90-95
	(Von Spelling, 1996)	85-95	80-93					30-40	30-45	60-90
Laguna anaerobia humedal	(Caicedo, 2005)	87-93	80-90					37-48	45-50	

(Rodríguez Miranda, et al., 2015)

3. MARCO LEGAL

En México, la administración del agua ha evolucionado de acuerdo con el marco legal que ha normado la ordenación del recurso al igual que la construcción de estructuras administrativas responsables de vigilar su cumplimiento (Aguirre Jimenez, 1995).

A continuación, se describe la normativa mexicana aplicable para el desarrollo de presente proyecto.

3.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de febrero de 1917 y reformada el DOF 6 de junio de 2019, señala lo siguiente:

- **Artículo 4°** (Párrafo V). “Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2019).

3.2 Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente

La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), publicada el 28 de enero de 1988 en el DOF y reformada por última vez el 5 de junio de 2018, menciona lo siguiente:

- **Artículo 117°** (Párrafo III). “El aprovechamiento del agua en actividades productivas susceptibles de producir su contaminación, conlleva la responsabilidad del tratamiento de las descargas, para reintegrarla en condiciones adecuadas para su utilización en otras actividades y para mantener el equilibrio de los ecosistemas” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2018).
- **Artículo 129°** “El otorgamiento de asignaciones, autorizaciones, concesiones o permisos para la explotación, uso o aprovechamiento de aguas en actividades económicas susceptibles de contaminar dicho recurso, estará condicionado al tratamiento previo necesario de las aguas residuales que se produzcan” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2018).

3.3 Ley de Aguas Nacionales

La Ley de Aguas Nacionales (LAN), publicada el 1 de diciembre de 1992 en el DOF y reformada el 24 de marzo de 2016 menciona que “La Autoridad del Agua, sancionará las siguientes faltas:

- **Artículo 119°** (Párrafo I) “Descargar en forma permanente, intermitente o fortuita aguas residuales en contravención a lo dispuesto en la presente ley en cuerpos receptores que

sean bienes nacionales, incluyendo aguas marinas, así como o cuando se infiltren en terrenos que sean bienes nacionales o en otros terrenos cuando puedan contaminar el subsuelo o el acuífero”. (Párrafo II) “Explotar, usar o aprovechar aguas nacionales residuales sin cumplir las Normas Oficiales Mexicanas en la materia y en las condiciones particulares establecidas para tal efecto” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2016).

3.4 Ley Federal de Derechos

La Ley Federal de Derechos, publicada el 31 de diciembre de 1981 y reformada por última vez el 28 de diciembre de 2018, indica que no se pagará el derecho al agua en las siguientes condiciones:

- **Artículo 224°** (Párrafo V). “Cando las aguas que regresen a su fuente original o que sean vertidas en cualquier otro sitio previamente autorizado por la Comisión Nacional del Agua en los términos de la Ley de Aguas Nacionales, siempre que tengan el certificado de calidad del agua expedido por esta última en los términos del Reglamento de la citada Ley” (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2018).

3.5 Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996

Esta Norma Oficial Mexicana entró en vigor el 7 de enero de 1997 y fue modificada por última vez el 5 de enero de 2018. Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, con el objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos. Es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas y no aplica a las descargas de aguas provenientes de drenajes separados de aguas pluviales (Secretaría de Economía, 1996).

3.6 Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996

Esta Norma Oficial Mexicana con vigencia desde el 4 de junio de 1998 y sin modificaciones a la fecha, establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal con el fin de prevenir y controlar la contaminación de las aguas y bienes nacionales, así como proteger la infraestructura de dichos sistemas. Es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas y no se aplica a la descarga de las aguas residuales domésticas, pluviales, ni a las generadas por la industria, que sean distintas a las aguas residuales de proceso y conducidas por drenaje separado (Secretaría de Economía, 1996).

3.7 Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997

Esta Norma Oficial Mexicana, cuya entrada en vigor corresponde al 22 de Septiembre de 1998, establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público de contacto directo y/o con contacto indirecto u ocasional (Secretaría de Economía, 1997).

3.8 Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002

Esta Norma con vigencia desde el 8 de Septiembre de 2003 y sin modificaciones a la fecha, establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger al medio ambiente y la salud humana (Secretaría de Economía, 2002).

3.9 Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011

Esta Norma Oficial Mexicana, cuya entrada en vigor corresponde al 31 de Julio de 2013, establece los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a plan de manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo (Secretaría de Economía, 2011).

3.10 Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005

Esta Norma entró en vigor el 21 de Septiembre de 2006 y establece el procedimiento para identificar si un residuo es peligroso, el cual incluye los listados de los residuos peligrosos y las características que hacen que se consideren como tales (Secretaría de Economía, 2005).

3.11 Norma Mexicana NMX-AA-3-1980

Esta Norma Mexicana fue publicada el 25 de Marzo de 1980 y establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales, con el fin de determinar sus características físicas y químicas, debiéndose observar las modalidades indicadas en las normas de métodos de prueba correspondientes (Secretaría de Economía, 1980).

3.12 Comentarios finales del capítulo

Aunque México dispone las leyes en materia de aguas residuales, existen problemas durante su cumplimiento. Por ejemplo, la calidad del agua se basa en la concentración de límites máximos permisibles en el efluente, sin embargo, a consideración del autor es preferible considerar la carga contaminante, la presencia de compuestos tóxicos y las condiciones ecológicas del cuerpo receptor de descargas residuales.

Por otra parte, son pocos los incentivos que otorgan las autoridades gubernamentales al sector industrial para la prevención y tratamiento de la contaminación hídrica. Esto conlleva que, en muchos casos, sea más barato utilizar agua subterránea de primer uso que agua residual tratada.

Por lo tanto, los incentivos económicos, vía subsidios, bonos, esquemas tarifarios o simplemente un efectivo cobro de servicios, pueden dar la pauta para hacer atractivo, desde un punto de vista financiero, el tratamiento de aguas residuales y su posterior utilización.

4. RESULTADOS

4.1 Estimación del caudal de agua residual de la organización.

A partir de la información obtenida en los monitoreos bimestrales al efluente de aguas residuales de la organización en el periodo 2016-2018, y tal como se observa en la **Figura 19** el caudal diario máximo registrado fue de 15.47 m³, en tanto que el mínimo diario de 8.04 m³, mientras que el caudal promedio equivale a 11.04 m³ al día. Cabe mencionar que, en el mes de noviembre de 2018 no se realizó el aforo del efluente, debido a la realización de obras civiles que impedían dicha tarea.

Las variaciones en el caudal se pueden atribuir a la alta o baja producción de la empresa, ya que de ella depende el número de empleados, así como el número de unidades de producción laborando al día, por consiguiente, el uso y descarga de agua aumenta o disminuye.

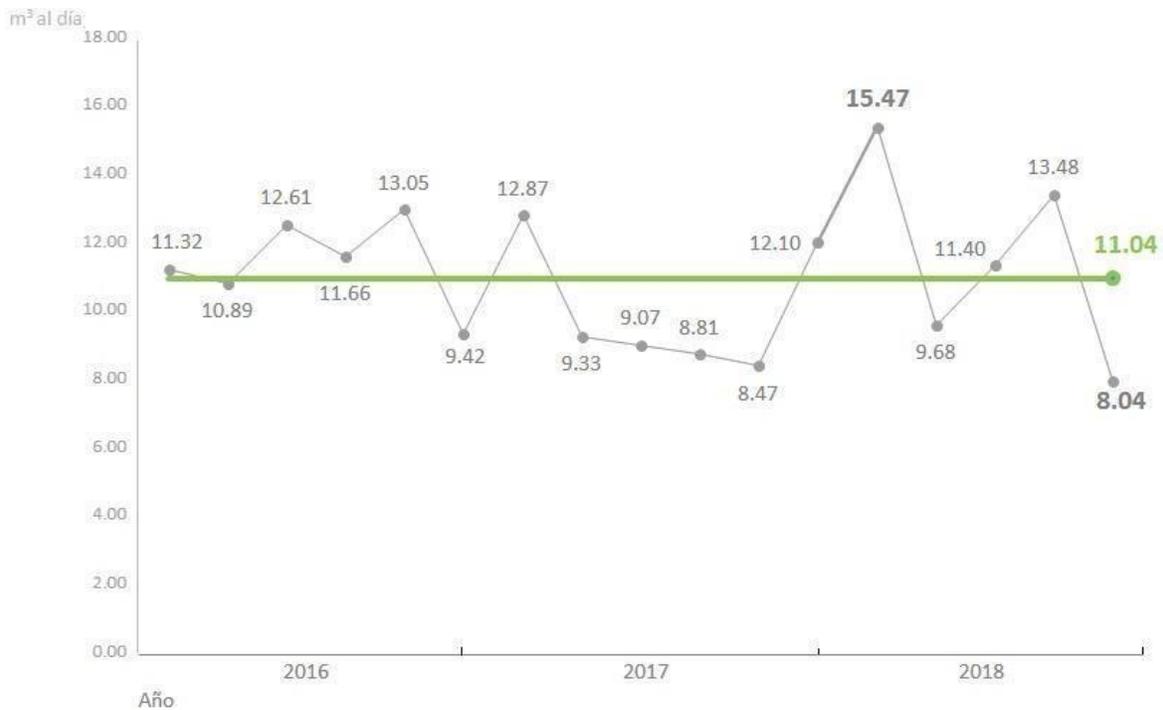


Figura 19 Caudal de agua residual de la empresa (Elaboración propia)

Con el fin de especificar la procedencia del agua residual de la compañía, se estimó teóricamente el caudal diario de aguas residuales de las áreas de servicios y áreas de procesos, debido a que no se cuentan con medidores internos que puedan precisar lo anterior.

El caudal de agua residual procedente de los servicios sanitarios, se estimó a partir del consumo aparente de agua potable al día multiplicado por un factor de retorno sugerido en la literatura especializada de 0.7

Como se muestra en la **Tabla 8** el consumo aparente de agua potable para servicios sanitarios es de 20.172 m³/día, mientras que el caudal de aguas residuales es de 14.120 m³/día. Siendo el área de regaderas en donde se presenta el caudal de aguas residuales más alto, a pesar de que estas son de tipo ecológico.

Tabla 8. Uso y descarga de aguas residuales en instalaciones sanitarias.

Tipo de instalación y usuarios	Promedio de usuarios	Gasto de agua	Promedio de uso por persona al día	Consumo de agua por persona al día	Consumo aparente de agua al día	Caudal estimado de aguas residuales
WC (personal operativo y administrativo)	218 personas	5 litros por descarga	2 veces al día	0.010 m ³	2.180 m ³ /día	1.526 m ³ /día
Regaderas (solo personal operativo)	190 personas	6.3 litros por minuto	15 minutos al día	0.094 m ³	17.860 m ³ /día	12.502 m ³ /día
Lavamanos (personal operativo, administrativo y contratista)	254 personas	0.13 litros por ciclo	4 veces al día	0.00052 m ³	0.132 m ³ /día	0.0924 m ³ /día
TOTAL					20.172 m³/día	14.120 m³/día

(Elaboración propia con datos aportados por la empresa)

En cuanto a la limpieza diaria en áreas de servicios como oficinas, comedor, pasillos y espacios en común, se tomó como referencia el consumo de agua reportado por personal de intendencia y se multiplicó por un factor de retorno de 0.7

En la **Tabla 9** se muestra que, diariamente se generan 0.234 m³ de aguas residuales. En este caso, el lavado de sanitarios y regaderas es la actividad donde más se consume y descarga agua.

Tabla 9. Uso y descarga de agua en la limpieza de áreas no operativas

Área	Consumo agua al día	Descarga de agua residual al día
Sanitarios y regaderas	0.200 m ³ día	0.140 m ³ /día
Oficinas	0.060 m ³ día	0.042 m ³ /día
Comedor	0.060 m ³ día	0.042 m ³ /día
Tarjas comedor	0.0150 m ³ día	0.010 m ³ /día

Área	Consumo agua al día	Descarga de agua residual al día
TOTAL		0.234 m³/día

(Elaboración propia con datos aportados por la empresa)

El caudal de agua residual de procesos internos se determinó a partir del consumo unitario de agua reportado por los empleados durante las distintas actividades de limpieza, posteriormente se multiplicó por la frecuencia en la que se realiza el proceso y finalmente por el factor de retorno de 0.7

Tal como se señala en la **Tabla 10**, el consumo de agua para actividades diferentes a la formulación de productos (limpieza), es de 0.542 m³ al día. De esta forma, el caudal de agua residual diario equivale a 0.379 m³ al día, siendo la limpieza de equipo de protección personal (mascarillas respiratorias y calzado de seguridad) la actividad que mayor aporta al caudal.

Tabla 10. Generación de agua residual de procesos internos

Tipo de proceso	Consumo unitario de agua	Frecuencia del proceso al día	Consumo de agua	Caudal de agua residual al día
Limpieza de unidades de producción	0.018 m ³ por unidad de producción	9 veces al día	0.162 m ³ al día	0.113 m ³ al día
Limpieza de equipo de protección personal	0.002 m ³ por empleado	190 empleados al día	0.380 m ³ al día	0.2660 m ³ al día
TOTAL			0.542 m³ al día	0.379 m³ al día

(Elaboración propia con datos aportados por la empresa)

El caudal diario de agua residual proveniente de las instalaciones externas a la planta pero que pertenecen a la empresa, se determinó a partir de las bitácoras de operación, en donde se registra el volumen mensual de agua residual que recibe pre tratamiento en la empresa. El promedio mensual de los últimos tres años anteriores a este proyecto es de 3.28 m³ que, dividido entre 30 días, equivale a 0.109 m³ diarios de agua residual **Tabla 11**.

Tabla 11. Generación de agua residual de procesos externos

Promedio caudal mensual	Promedio caudal diario (30 días)
3.28 m ³	0.109 m ³ día

(Elaboración propia con datos aportados por la empresa)

Tal como se resume en la **Figura 20**, se estima que el 97 % del caudal de agua residual de la empresa se genera en las áreas de servicios sanitarios y la limpieza de áreas no operativas, mientras que el

agua residual de procesos internos representa el 2 % y el agua residual de procesos externos equivale al 1 %.

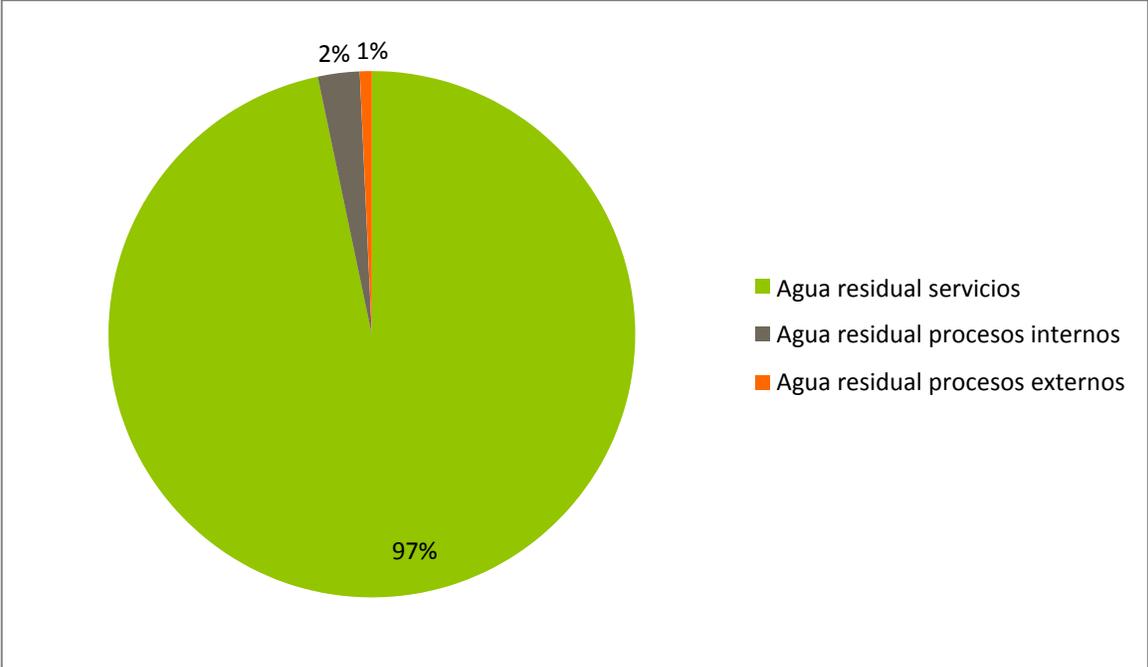


Figura 20 Proporción del agua residual de la empresa de acuerdo al área de generación (Elaboración propia)

4.2 Análisis histórico de la calidad del efluente de la empresa.

A partir de los resúmenes anuales de los monitoreos físico-químicos al efluente de agua residual en el periodo 2010-2018, se obtuvieron los siguientes valores promedio en la concentración y carga contaminante:

Sólidos

La concentración promedio anual de sólidos totales del efluente es igual a 902.0 mg/L, en cuanto a sólidos disueltos, ésta equivale a 774.1 mg/L, lo que representa el 86 % de los sólidos totales. En tanto que el 14 % restante, es decir los sólidos suspendidos, su concentración promedio es de 127.9 mg/L.

De acuerdo con la información de la **Tabla 6** las concentraciones de sólidos totales y sólidos disueltos corresponden a una concentración “media” característica de un agua residual, en tanto que los sólidos suspendidos su concentración se clasifica como “débil”.

Como se puede apreciar en la **Figura 21**, dichas concentraciones se han mantenido relativamente constantes a lo largo del tiempo, con excepción de 2010 y 2015 en donde se presentaron aumentos significativos.

En general, el efluente de la empresa no sobrepasa el límite de 1 500 mg/L de sólidos totales y 350 mg/L de sólidos suspendidos que les son solicitados para su tratamiento integral. Sin embargo, la normativa para la reutilización de aguas tratadas sugiere una concentración máxima de 20 mg/L de sólidos suspendidos en el efluente.

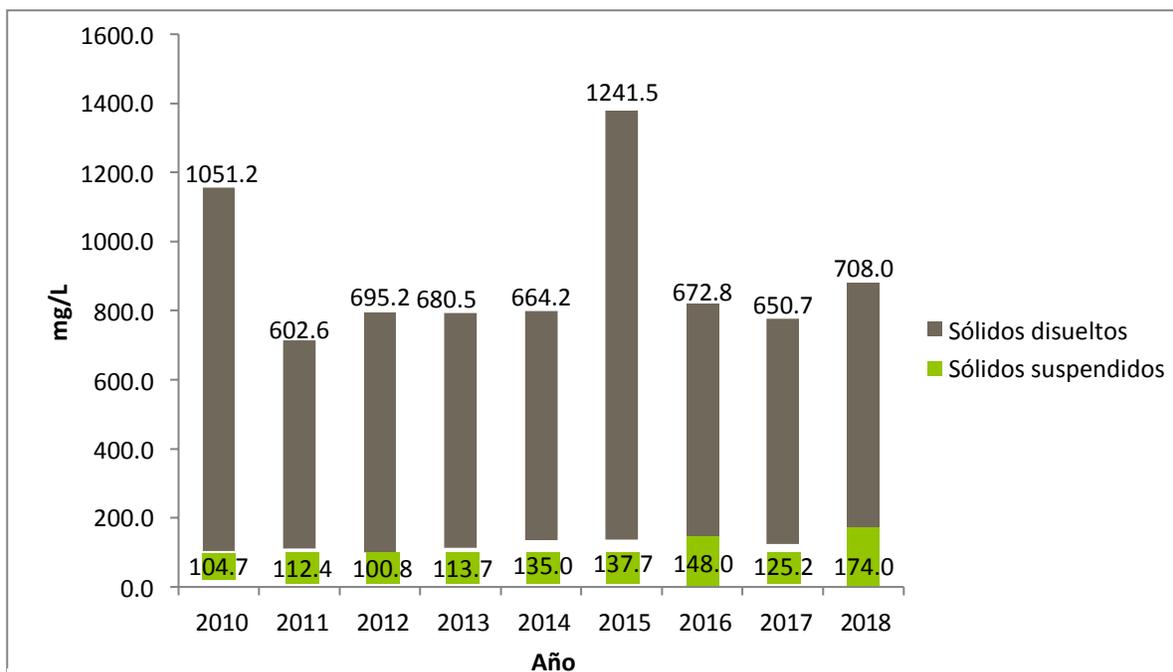


Figura 21 Concentración de sólidos en el efluente de la planta (Elaboración propia)

En la **Figura 22**, se observa que la carga contaminante por sólidos disueltos ha disminuido en los últimos ocho años y se mantiene constante para el caso de los sólidos suspendidos. De esta forma, se infiere que diariamente se genera en promedio de 10.1 kg de sólidos disueltos y 1.6 kg de sólidos suspendidos.

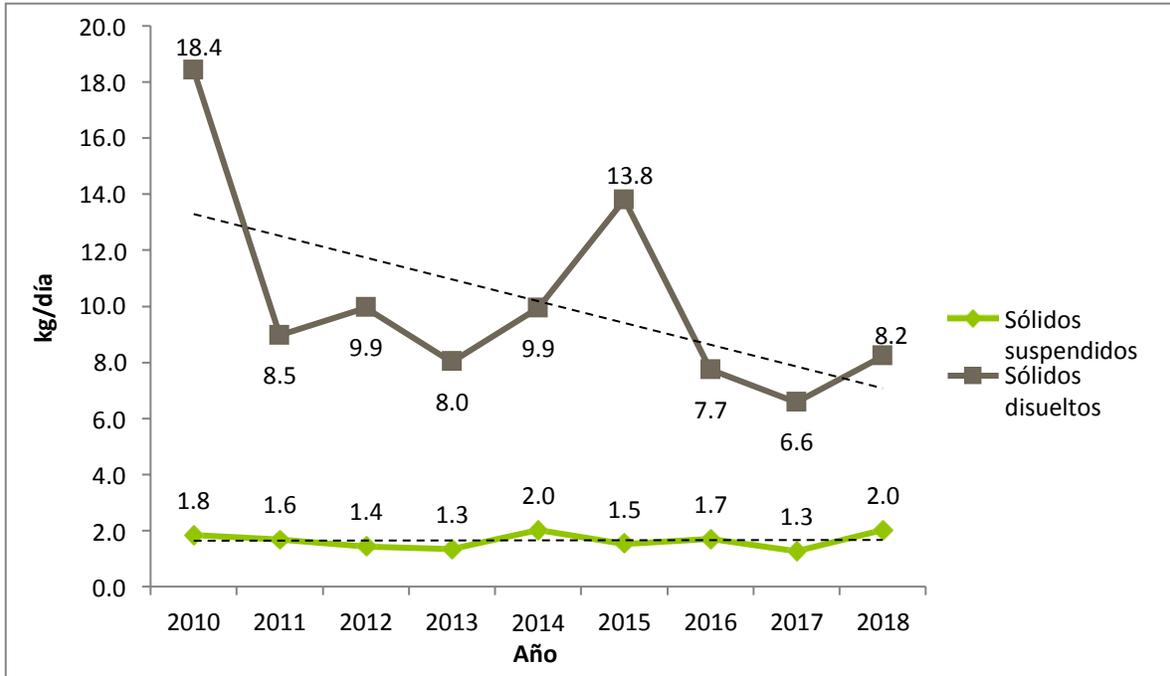


Figura 22 Carga contaminante por sólidos en el efluente (Elaboración propia)

Grasas y aceites

La concentración promedio de grasas y aceites en el efluente es de 27.90 mg/L, la cual ha aumentado ligeramente en los últimos ocho años. De acuerdo con Metcalf & Eddy INC., 1995 dicha concentración se clasifica como “débil”, en tanto que Hernández, 1996, sugiere que se trata de una concentración “media” en el efluente.

Tal como se muestra en la **Figura 23** esta concentración no sobrepasa el límite indicado de 70 mg/L, sin embargo, la normativa mexicana para la reutilización del agua tratada establece un máximo de 15 mg/L.

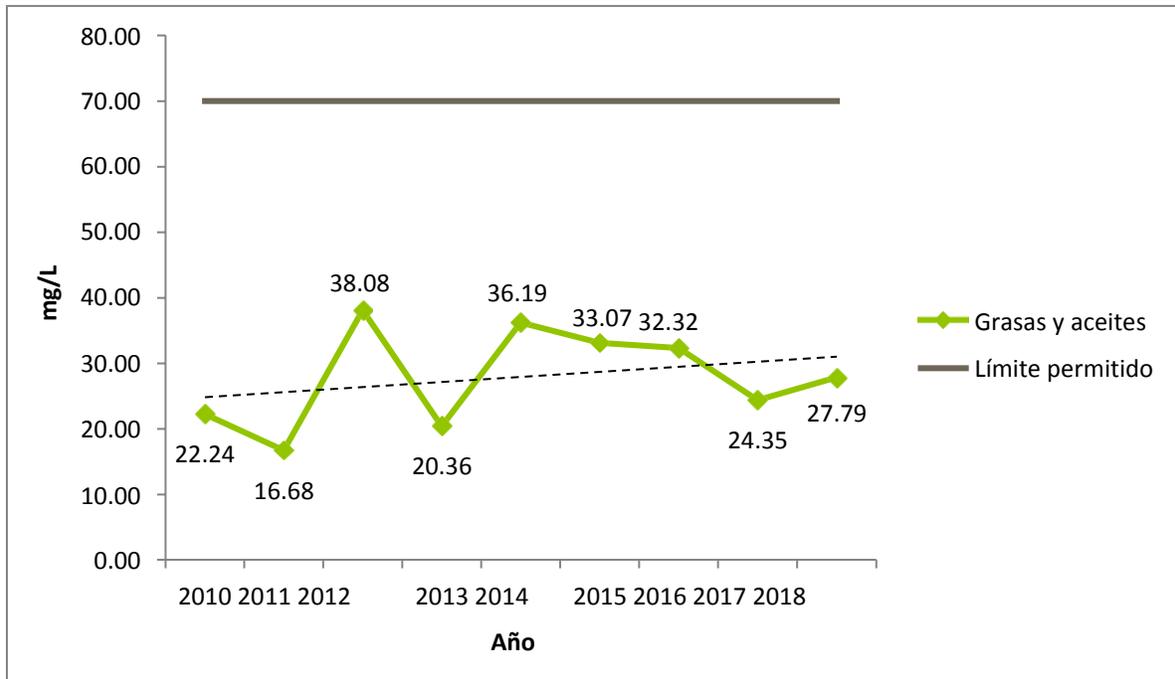


Figura 23 Concentración de grasas y aceites en el efluente (Elaboración propia)

En lo que se refiere a la carga contaminante, en promedio se vierten en el efluente 0.36 kg diarios de grasas y aceites. Como se puede observar en la **Figura 24** dicha tendencia ha decrecido ligeramente en el tiempo en donde la carga máxima se presentó en 2012 y 2014.

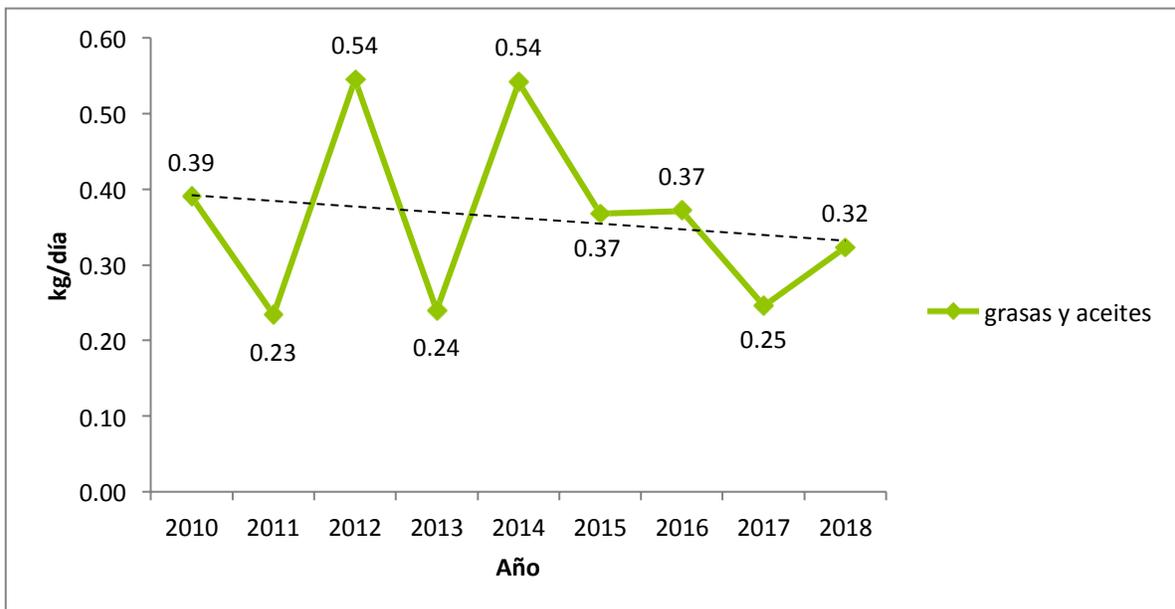


Figura 24 Carga contaminante grasas y aceites en el efluente (Elaboración propia)

Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅)

En el caso de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la concentración promedio en el efluente de 525.39 mg/L, en tanto que la concentración promedio de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) es de 247.04 mg/L. En ambos casos, la concentración se clasifica como “media” de acuerdo con la información de la **Tabla 6**.

El efluente en su mayoría de naturaleza orgánica ya que la relación DQO/DBO es menor a 2.5, lo que significa que los tratamientos biológicos son los más favorables, además de menos costosos en comparación con los tratamientos químicos.

Como se muestra en la **Figura 25**, las concentraciones de DQO y DBO presentan una ligera tendencia a incrementarse en el tiempo. Sin embargo, la concentración de DQO no sobrepasa el límite establecido de 1 500 mg/L, mientras que la concentración de DBO, únicamente sobrepasó el límite establecido de 600 mg/L en 2015.

Cabe destacar que el límite máximo permisible señalado por la normativa ambiental para la reutilización del agua tratada exige una concentración de DBO menor a 20 mg/L.

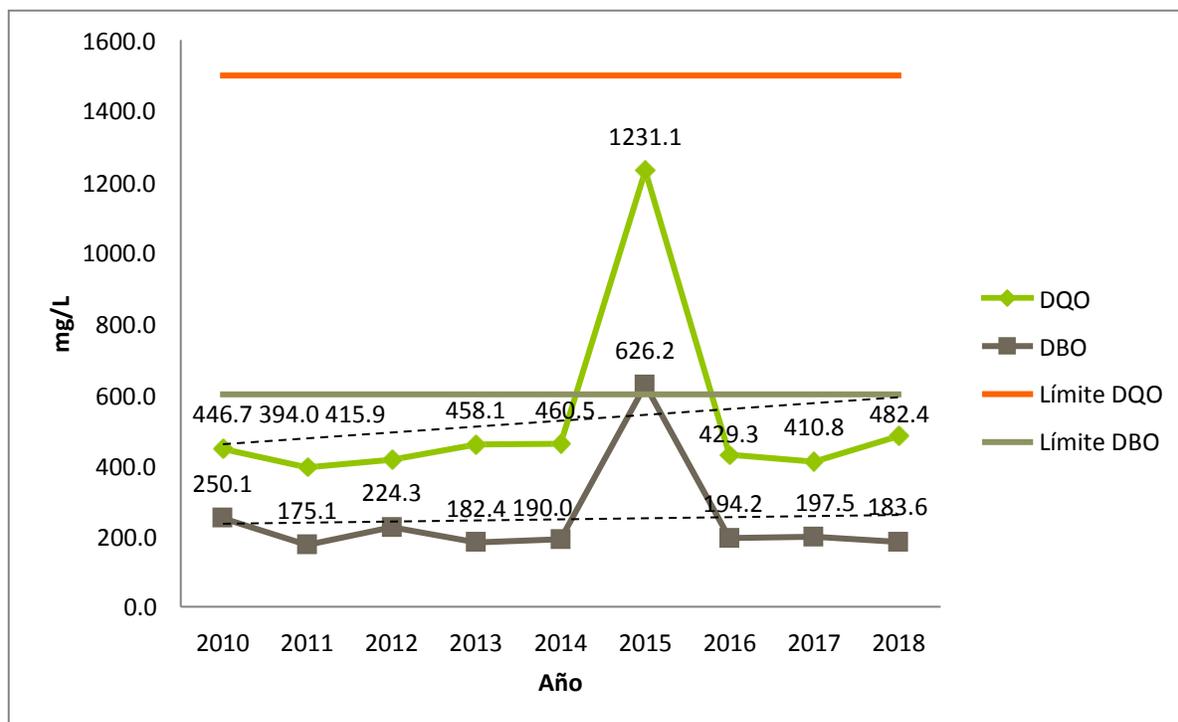


Figura 25 Concentración DQO y DBO en el efluente (Elaboración propia)

Si bien la concentración de DQO y DBO tienen una tendencia a aumentar en el tiempo, en la **Figura 26** se puede constatar que la carga contaminante en el efluente presenta una ligera tendencia a disminuir. Por lo tanto, se infiere que se diariamente se vierten en promedio alrededor de 6.7 kg de contaminantes químicamente oxidables, de los cuales 3.2 kg son biológicamente oxidables.

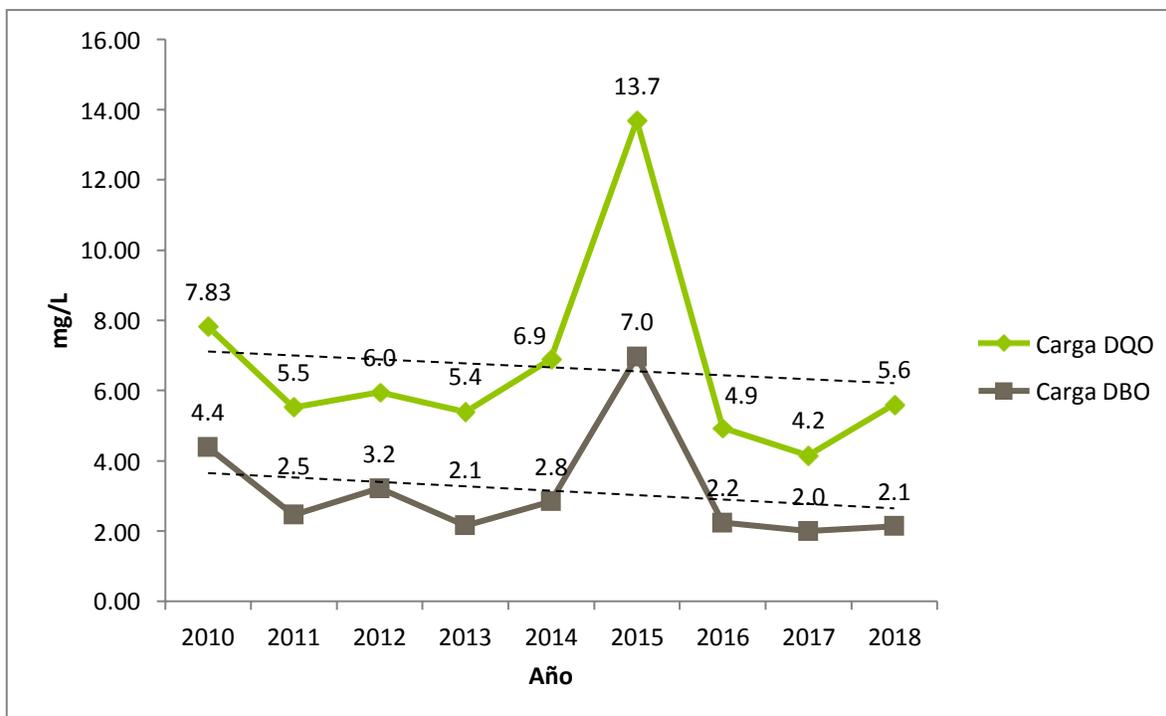


Figura 26 Carga contaminante DQO y DBO en el efluente (Elaboración propia)

Nitrógeno Total (NTK)

En la **Figura 27**, se puede apreciar que la concentración promedio de nitrógeno total (NTK) presenta ligera tendencia decreciente a lo largo del tiempo. Sin embargo, el promedio es de 93.47 mg/L, por lo cual sobrepasa el límite establecido de 60 mg/L. Esta concentración, de acuerdo con la **Tabla 6** se clasifica como “fuerte”.

El análisis histórico demuestra que las concentraciones fuera de lo establecido de nitrógeno total no son un problema reciente, ni resultado de eventos puntuales de contaminación como derrames o limpiezas generales extraordinarias.

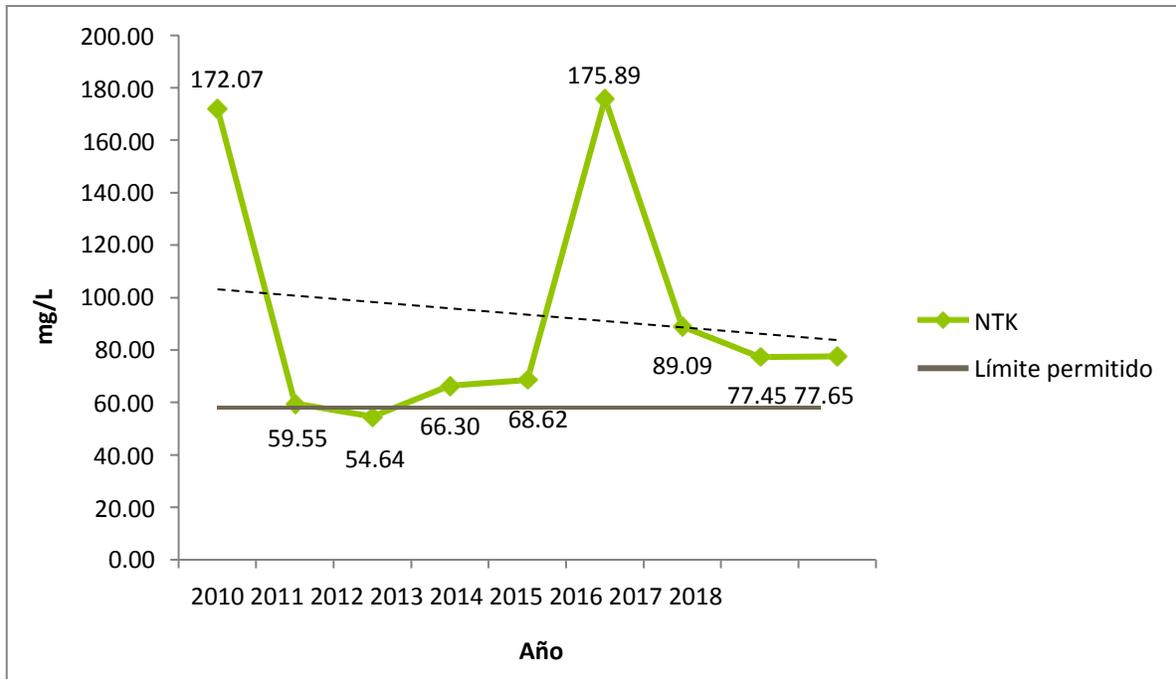


Figura 27 Concentración de Nitrógeno Total en el efluente (Elaboración propia)

En la **Figura 28**, se puede observar que al igual que la concentración, la carga contaminante de nitrógeno total ha presentado una tendencia a disminuir en el tiempo. Sin embargo, la carga contaminante del efluente oscila entre 0.84 kg y 3.02 kg diarios de nitrógeno que son descargados en el efluente.

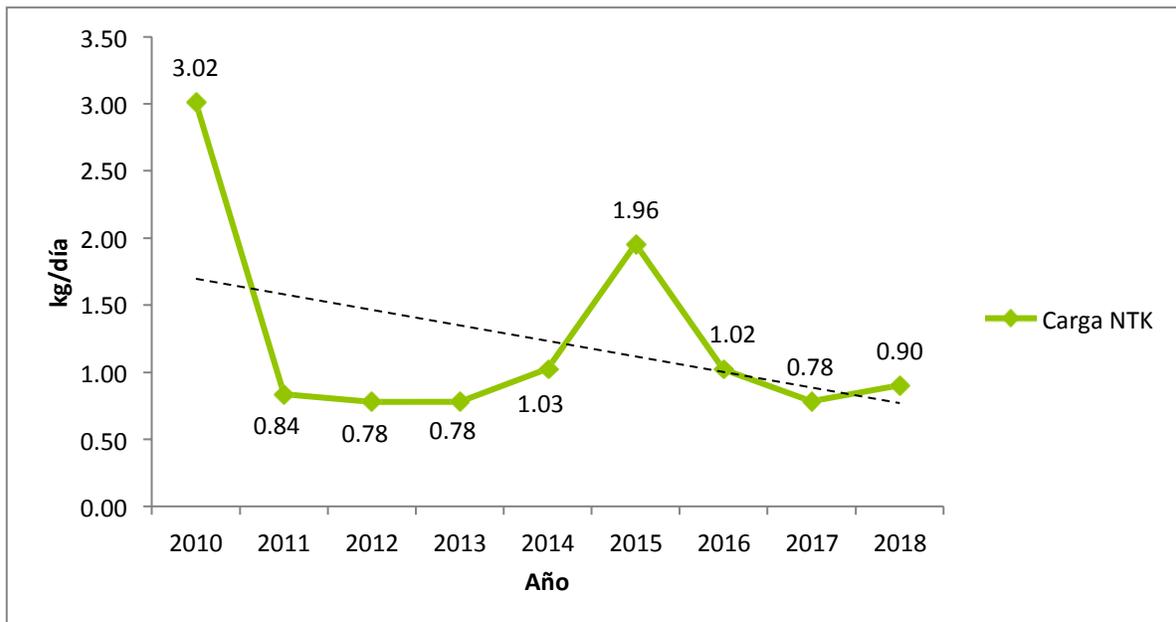


Figura 28 Carga contaminante de Nitrógeno en el efluente (Elaboración propia)

Fenoles

En la **Figura 29**, se observa que la concentración promedio es de fenoles es 0.08 mg/L, la cual ha sido relativamente constante a lo largo del tiempo y además no sobrepasa el límite establecido de 0.5 mg/L para su tratamiento externo.

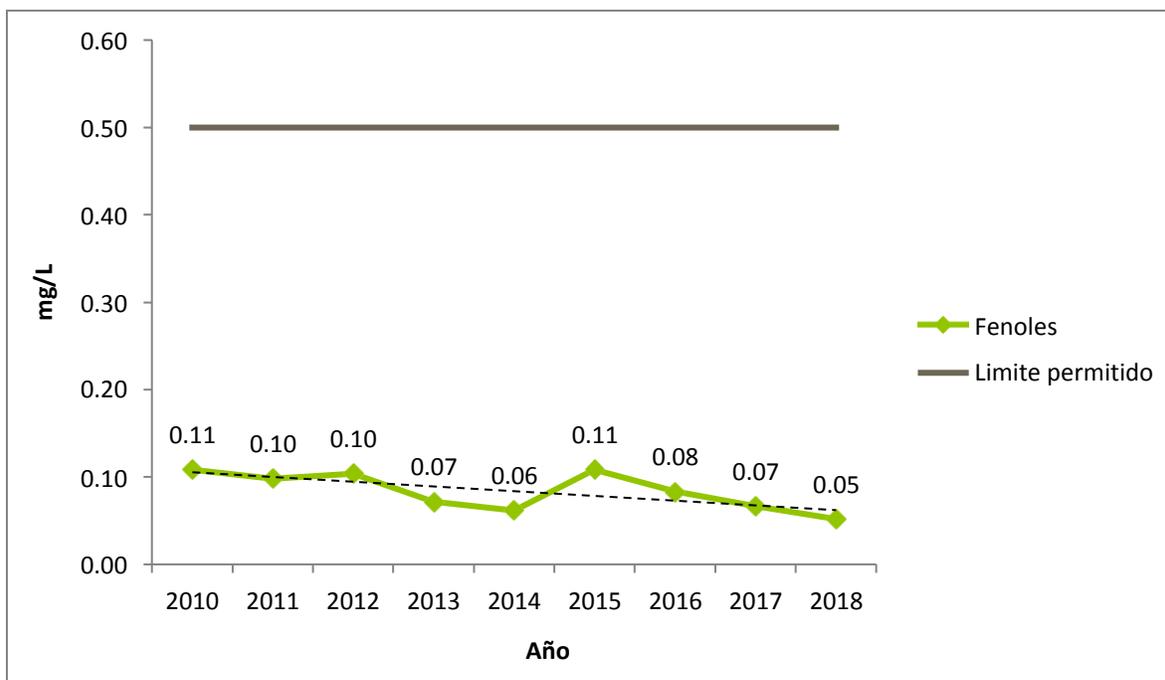


Figura 29 Concentración de fenoles en el efluente (Elaboración propia)

Tal como se muestra en la **Figura 30**, la carga contaminante de fenoles en el efluente presenta una marcada tendencia a disminuir. Cabe señalar que en promedio el efluente contiene 0.0011 kg de fenoles.

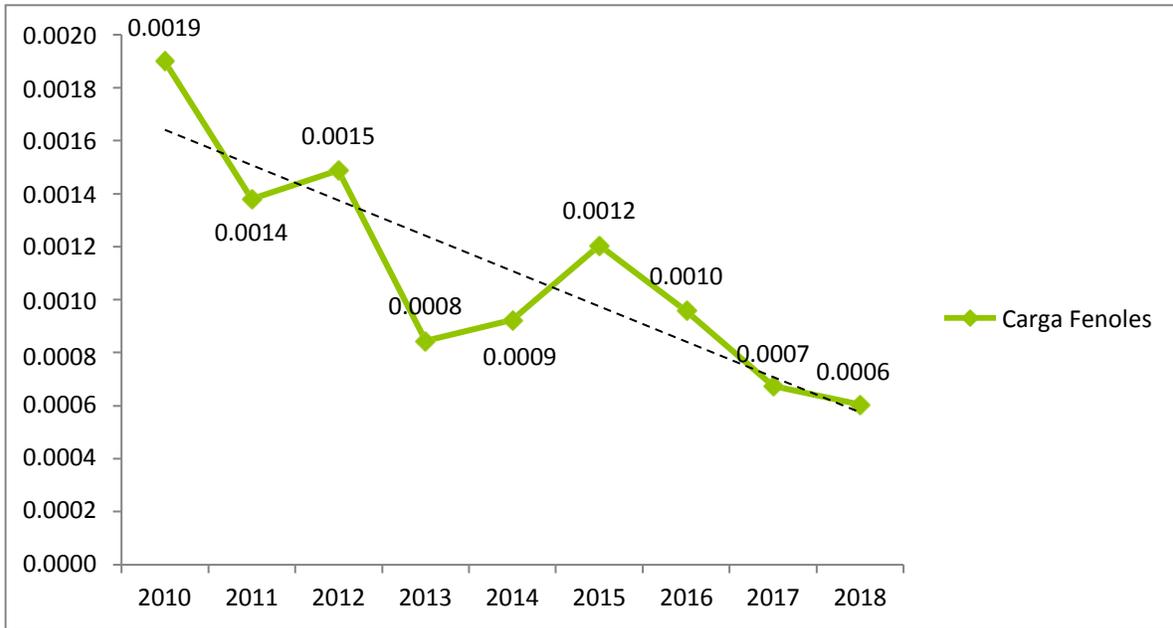


Figura 30 Carga contaminante de fenoles en el efluente (Elaboración propia)

Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)

La concentración promedio en el efluente de Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM) es de 1.93 mg/L, sin embargo, en los últimos dos años ha sido mayor 2.0 mg/L, el cual es el límite máximo establecido para su tratamiento externo.

Es importante resaltar que, tal como se muestra en la **Figura 31**, la concentración de SAAM en el efluente ha incrementado a lo largo del tiempo y, contrario a otros parámetros, las concentraciones sobrepasan o son muy cercanos al límite.

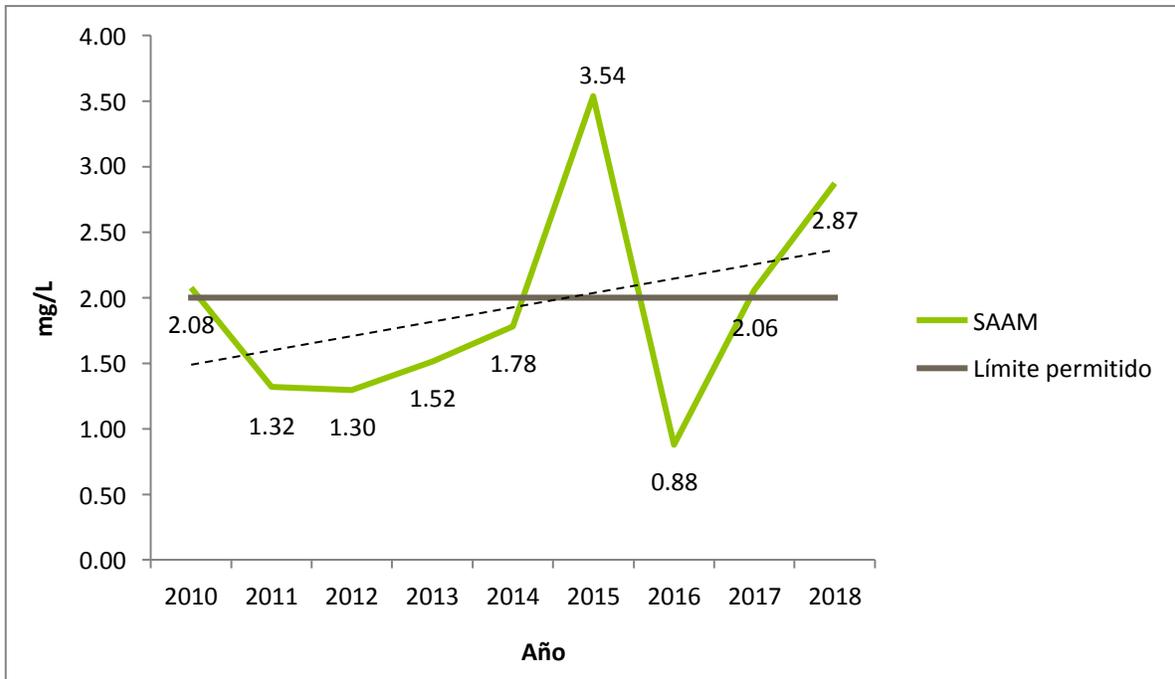


Figura 31 Concentración de SAAM en el efluente (Elaboración propia)

La carga contaminante diaria de SAAM es de 3.02 kg de SAAM, con un máximo de 0.039 kg y un mínimo de 0.010 kg. En la **Figura 32**, se muestra que, al igual que la concentración, la carga contaminante presenta una tendencia constante a lo largo del tiempo.

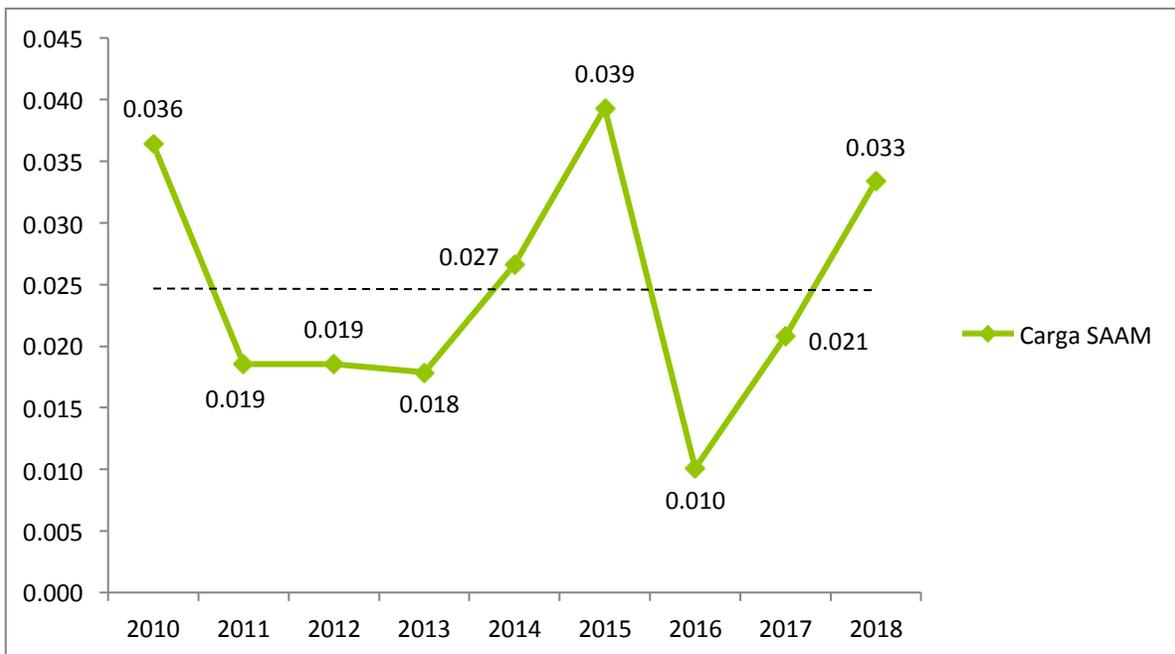


Figura 32 Carga contaminante de SAAM en el efluente (Elaboración propia)

4.3 Determinación de las concentraciones de nitrógeno total y sustancias activas al azul de metileno en los diferentes efluentes internos de la organización.

Con el objetivo de identificar las áreas cuya agua residual excede las concentraciones límite de Nitrógeno Total y Sustancias Activas al Azul de Metileno, solicitadas externamente para su tratamiento integral, se colectaron una muestra simple en los efluentes de las áreas señaladas en la **Figura 33** por ser representativas las operaciones normales de la organización bajo estudio.

En la **Tabla 12** se señalan los resultados obtenidos por el Laboratorio de Análisis Industriales ARVA S.A de C.V, acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA).

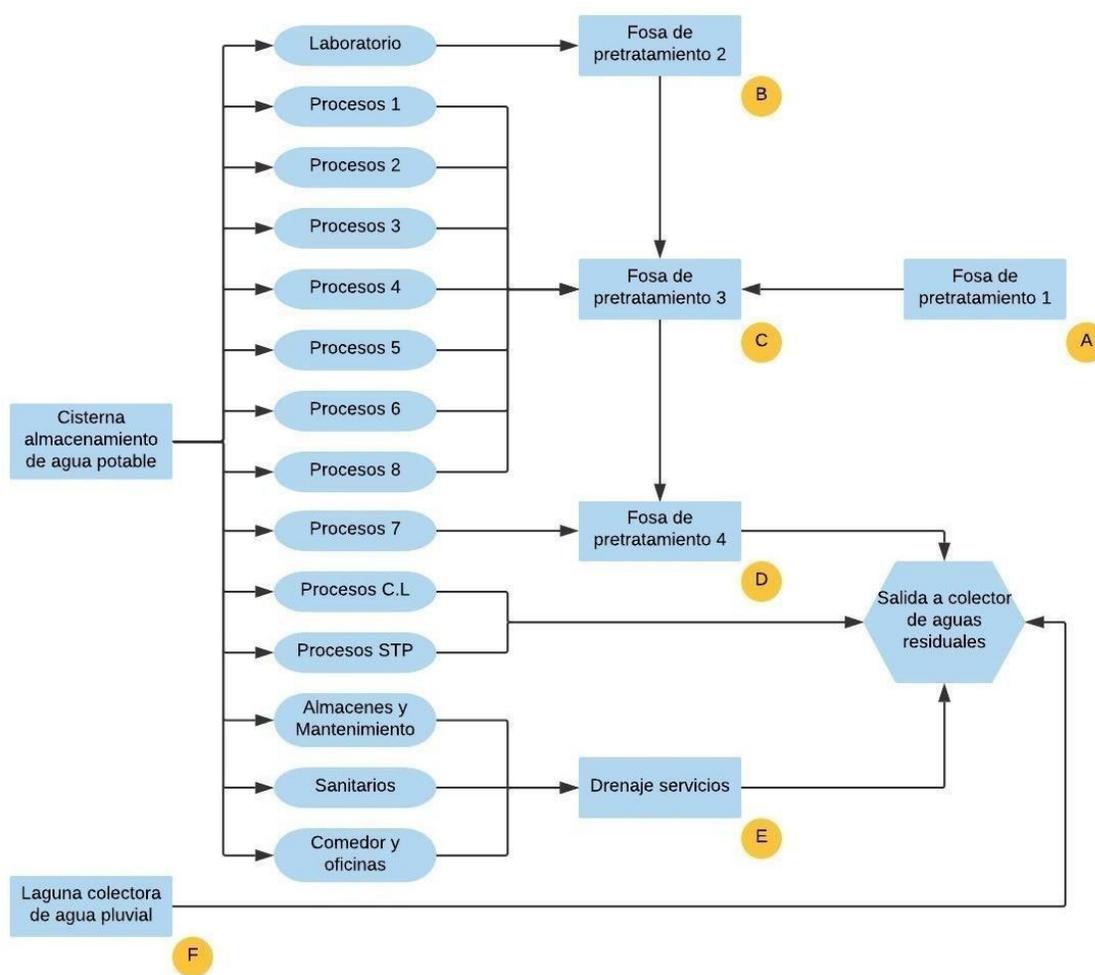


Figura 33 Diagrama de procesos y puntos de muestreo de agua residual (Elaboración propia)

Tabla 12. Muestreo interno de aguas residuales de procesos y servicios en la planta

Área de muestreo	SAAM	Cumple/No cumple	Nitrógeno Total	Cumple/No cumple
Punto A	68.789 mg/L	No cumple	63.57 mg/L	No cumple
Punto B	0.145 mg/L	Si cumple	19.22 mg/L	Si cumple
Punto C	0.218 mg/L	Si cumple	7.54 mg/L	Si cumple
Punto D	5.201 mg/L	No cumple	12.49 mg/L	Si cumple
Punto E	0.322 mg/L	Si cumple	45.09 mg/L	Si cumple
Punto F	0.343 mg/L	Si cumple	4.96 mg/L	Si cumple

(Elaboración propia con datos aportados por laboratorio)

Punto A

La muestra del punto A corresponde a la fosa de pretratamiento específica para el agua residual proveniente de procesos externos a la empresa. La muestra presentó un color azul turbio con pH de 7.2 en la que se percibían olores característicos del producto.

La concentración de SAAM es de 68.78 mg/L, la cual es la concentración más alta entre las áreas muestreadas. Por otra parte, la concentración de Nitrógeno Total es de 63.57 mg/L, la cual es ligeramente superior a lo establecido por la planta tratadora externa y de igual forma, la concentración más alta para este parámetro. Sin embargo, su aporte corresponde al 1 % del efluente de la compañía.

Punto B

La muestra del punto B corresponde a la fosa de pretratamiento específica para el laboratorio de calidad. La muestra presentó un color ocre turbio con pH de 5.4 en el que se percibían olores característicos del producto.

En este caso, la concentración de SAAM es de 0.145 mg/L, en tanto que la concentración de Nitrógeno Total es igual a 19.22 mg/L. Los anteriores resultados se pueden atribuir al lavado de material impregnado con residuos de materia prima nitrogenada y el vertido de muestras de producto terminado, a pesar de que se cuentan procedimientos específicos para su disposición como residuos de manejo especial.

Fosa C

La muestra del punto C corresponde a la fosa de pretratamiento de áreas de procesos diferente al área de procesos 7. La muestra presentó un color ligeramente gris cristalino con un pH de 7.2, en

que no se percibían olores característicos de producto. La muestra colectada en esta fosa no tuvo interferencia del agua residual proveniente de los puntos A y B.

La concentración de SAAM es de 0.218 mg/L, en este caso, la concentración aumenta ligeramente con respecto a la fosa de laboratorio, debido a la presencia de residuos tensoactivos provenientes de jabones o materia prima. La concentración de Nitrógeno Total es de 7.54 mg/L, la cual es menor a la fosa de laboratorio, a pesar de que se en estas áreas se realiza el lavado del equipo de protección personal y las unidades de producción al final del turno.

Punto D

La muestra del punto D corresponde a la fosa de pretratamiento del proceso 7, previo a la mezcla con el agua proveniente de las anteriores fosas. La muestra presentó un color gris ligeramente turbio con un pH de 6.5, en el que no se percibían olores característicos de los productos.

La concentración de SAAM es de 5.201 mg/L, la cual es muy superior al límite sugerido por la planta tratadora externa. Sin embargo, la concentración de Nitrógeno Total es de 12.49 mg/L, si bien está por debajo del límite establecido, es importante resaltar el aumento considerable con respecto a la fosa de pretratamiento de las otras áreas de procesos.

Punto E

La muestra del punto E fue colectada en el registro sanitario del área de servicios sanitarios sin la interferencia del agua residual de procesos y agua pluvial. La muestra presentó un color café ligeramente turbio con un pH de 6.8, contrario al agua residual de procesos, la presencia de sólidos era notoria.

La concentración de SAAM es de 0.322 mg/L, que puede deberse a la presencia de tensoactivos de los shampoos o jabones para aseo. Mientras que la concentración de Nitrógeno Total es de 45.09 mg/L.

Si bien los valores son inferiores a los reportados en los monitoreos bimestrales, cabe señalar que la concentración de nitrógeno puede incrementarse en ciertas horas del día ya que no se cuenta con tanques de homogeneización de cargas contaminantes en el efluente, lo cual es importante tomar en consideración ya que el 97% del efluente de aguas residuales de la empresa se compone de aguas sanitarias.

Punto F

La muestra del punto F fue colectada en el drenaje pluvial procedente de la laguna de captación de agua pluvial, la cual sirve como almacén del agua a fin de evitar inundaciones. La muestra presentó un color ligeramente gris cristalino con un pH de 7.3, la cual no presentaba una significativa aportación de sólidos ni olores característicos de producto.

La concentración de SAAM es de 0.343 mg/L lo cual puede atribuirse a la interferencia de tensoactivos en la red de bombeo de la laguna al efluente de la planta ya que esta atraviesa unidades

de proceso. Por otra parte, el contenido de Nitrógeno Total es el más bajo registrable, a pesar de que la laguna de almacenamiento de agua pluvial no cuenta con geomembrana y, por tanto, recibe aportes de nitrógeno presentes en el suelo.

Hasta este punto de la investigación se concluye que el sistema de tratamiento de aguas residuales debe enfocarse en el agua residual procedente de los servicios sanitarios debido a que representa el 97% del efluente de la planta, no se cuenta con algún tipo de tratamiento previo o de control sobre este efluente y aunque los resultados muestran que la calidad del agua es inferior a los límites establecidos, la carga contaminante es alta.

Por otra parte, el actual sistema de pre tratamiento de aguas de procesos no está cumpliendo de manera eficiente su función, lo cual puede deberse a fallas humanas o mecánicas. En este caso, se recomienda revisar las condiciones operativas de este sistema y de ser posible optar por alternativas como la limpieza en seco.

4.4 Selección del sistema de tratamiento

Aunque existen múltiples sistemas de tratamiento, únicamente se tomaron en consideración aquellos disponibles en el mercado local a fin de evitar un aumento considerable en los costos de importación y/o transporte de tecnología. Dichos sistemas fueron: 1) sistema convencional de lodos activados, 2) reactores discontinuos secuenciales (SBR), 3) reactores biológicos de lecho móvil (MBBR) y 4) sistemas de humedales artificiales.

Para seleccionar el sistema de tratamiento adecuado según las necesidades y contexto de la organización se elaboró una matriz multi criterio. De esta forma, se seleccionaron catorce criterios de decisión. Se asignó un peso relativo de 5 si tiene importancia e implicación sobresaliente frente a los demás criterios, mientras que un peso relativo de 3, corresponde a un criterio con menores implicaciones e impactos. La evaluación de cada criterio obedece a un rango típico de calificación empleado alrededor del mundo, donde una puntuación de 5 significa sobresaliente, 3 suficiente y 1 deficiente (CAR Cundinamarca, 2011).

A continuación, se describen los criterios de decisión y la puntuación asignada para cada caso:

Costos de construcción: Se asignó un peso relativo de 5. La importancia de este criterio radica en que se busca que los proyectos de mejora para la compañía sean económicamente costeables de acuerdo con presupuesto anual destinado para estos fines. En este caso, el sistema que destaca es el de humedales artificiales debido a que los costos de construcción son más bajos en comparación con las otras tecnologías evaluadas cuyo costo es suficientemente favorable.

Costos de mantenimiento: Se asignó un peso relativo de 5. Todo sistema de tratamiento requiere de mantenimiento preventivo y correctivo durante el año, lo cual representa costos para la empresa, por lo tanto se busca que éstos costos sean los más convenientes. Nuevamente el sistema más sobresaliente es el de humedales artificiales ya que la experiencia en otros estudios señala que el mantenimiento es mínimo debido a la simplicidad de sus componentes (Rodríguez Miranda, et al., 2015).

Tolerancia a caudales altos o bajos: Se asignó un peso relativo de 5. El caudal de agua residual es proporcional a la producción, la cual depende de la temporada del año así como las decisiones de la compañía en la manera de producir. Por lo tanto, es importante considerar que se pueden presentar caudales muy altos o muy bajos a través del tiempo. En este caso, el sistema más sobresaliente es el de tipo SBR debido a que trabaja por medio de ciclos programables de llenado-reacción-vaciado.

Calidad del efluente: Se asignó un peso relativo de 5. Este es un criterio importante debido a que el agua tratada tiene como propósito su reutilización en la compañía o en su caso transferir agua de mejor calidad para el cumplimiento regulatorio. Por lo tanto, el sistema más sobresaliente es el de tipo SBR debido a que ofrece muchas más ventajas en la eliminación de nutrientes y materia orgánica en comparación con los sistemas convencionales (Cárdenas, et al., 2006).

Requerimiento mínimo de área: Se asignó un peso relativo de 5. Aunque la empresa dispone de una superficie no construida, se busca que el sistema de tratamiento sea lo más compacto a fin de que el proyecto de tratamiento no limite el espacio para otros proyectos como la instalación de nuevas unidades de producción o su expansión. En este caso, el sistema más deficiente es el de humedales artificiales debido a que requiere de mayor espacio, mientras que los demás resultan suficientemente adecuados, incluso estos pueden ser instalaciones subterráneas de acuerdo con lo señalado por los fabricantes.

Seguridad laboral: Se asignó un peso relativo de 5. En este caso, la empresa bajo estudio se caracteriza a nivel internacional por sus políticas de seguridad laboral y prevención de incidentes, por lo tanto, se busca que todo proyecto de mejora sea seguro para los operadores, independientemente de los costos o las ganancias económicas. Debido a la simpleza de sus componentes el sistema de humedales es el más sobresaliente en tanto que los sistemas convencionales son suficientemente convenientes debido a que su mantenimiento demanda la entrada a espacios confinados, aunque cabe resaltar que se cuenta con los protocolos de seguridad para estos casos.

Experiencia comprobada: Se asignó un peso relativo de 5. Hoy en día existen muchas innovaciones en el tratamiento de aguas, sin embargo, son pocas las tecnologías que logran comercializarse y en su caso, constituirse como empresa. De esta forma, las tecnologías que están disponibles en el mercado cuentan con certificados de garantía que acreditan su funcionalidad. Debido a que el sistema de humedales artificiales no es frecuente emplearlo en industrias se asignó una puntuación suficiente, en los otros casos la puntuación fue sobresaliente.

Mínimos riesgos de rendimiento: Se asignó un peso relativo de 5. Comúnmente en la industria se implementan proyectos de mejora que, con el paso del tiempo, resultan obsoletos o el rendimiento baja debido a cambios en la manera de producir o indisciplina operativa y de supervisión. Tomando en cuenta estos factores de riesgo, el sistema de tratamiento más sobresaliente es el de tipo SBR ya que el sistema puede ser readaptado fácilmente y contrario a los otros procesos, estos demandan más recursos para ser adaptables.

Cantidad de biosólidos: Se asignó un peso relativo de 5. Este punto también es importante ya que evidentemente la disposición de lodos representa costos para la compañía como parte de la disposición de residuos peligrosos o no peligrosos, por lo tanto, se busca que las tecnologías de tratamiento de agua generen la menor cantidad de subproductos de tratamiento. Tomando en cuenta lo anterior, el sistema con menor producción de subproductos es el de humedales artificiales de acuerdo con la literatura especializada, en tanto que el resto de tratamientos resultan suficientemente favorables (Metcalf & Eddy INC., 1995).

Requerimientos mínimos de energía: Se asignó un peso relativo de 3. Los consumos de energía eléctrica en un sistema de tratamiento se enfocan sobretodo en la operación de equipos de bombeo, mezcla o aireación. Sin embargo, estos dispositivos generalmente son de bajo consumo, por lo que el incremento en el consumo energético resulta poco significativo en comparación con el

resto de la maquinaria de producción. De esta forma, el sistema más sobresaliente energéticamente es el de humedales artificiales debido a que son sistemas pasivos de tratamiento, en tanto que el resto de sistemas resultan suficientemente convenientes.

Problemas potenciales por condiciones atmosféricas: Se asignó un peso relativo de 3. Este criterio es importante para la selección del sistema de tratamiento ya que la empresa de estudio se ubica en una zona geográfica propensa a inundaciones y lluvias de hasta 1 000 mm al año. Además de una temperatura promedio anual de 14° C. Por lo tanto, se busca que los sistemas de tratamiento sean resilientes a estas condiciones. En este caso, los sistemas más sobresalientes son los de tipo SBR y MBBR ya que su diseño es cerrado, en tanto que el sistema convencional de lodos activados es medianamente conveniente ya que generalmente los reactores están expuestos a la lluvia, sin embargo, esto puede variar de acuerdo con el diseño, en tanto que el sistema más deficiente es el de humedales artificiales.

Simplicidad operacional: Se asignó un peso relativo de 3. La simplicidad operacional es importante ya que no es común contar con personal capacitado en la operación, supervisión y mantenimiento de este tipo de tecnologías, por lo que es conveniente que los procesos sean simples y el personal actual de la planta sea capaz de llevar a cabo sus funciones previa capacitación y sin necesidad de recurrir a la búsqueda de nuevos puestos para lo anterior. De esta forma, el sistema de humedales es el que resulta el más sobresaliente, en tanto que los demás son suficientemente favorables.

Capacidad de expansión modular: Se asignó un peso relativo de 3. Este punto resulta importante ante los cambios en la normativa ambiental en el que la calidad de agua tratada deba ser superior a la establecida hoy en día, por lo tanto, el diseño del sistema de tratamiento debe permitir adicionar fácilmente una posterior etapa para el pulimiento del efluente, por ejemplo, oxidación avanzada, ultrafiltración, etc. De esta forma, el sistema de humedales es el más inconveniente para lo anterior, en tanto que los sistemas de tipo SBR y MBBR resultan los más sobresalientes.

Facilidad para mejorar procesos: Se asignó un peso relativo de 3. Como parte de las políticas de mejora continua de la compañía, todo proceso debe ser mejorado con el tiempo. Bajo este panorama, todos los sistemas resultan suficientemente favorables para su mejora continua, siempre que la tecnología disponible en el mercado nacional lo permita.

Como conclusión de ese apartado, de acuerdo con los criterios de evaluación y tecnologías seleccionadas, la matriz multi criterio de la **Tabla 13** muestra que el tratamiento más apropiado es por medio de reactores discontinuos secuenciales (SBR). La principal ventaja radica en su versatilidad para conseguir una calidad de efluente adecuada a los cambios temporales en las operaciones de la empresa.

Tabla 13 Matriz multi criterio para la selección del sistema de tratamiento de aguas residuales

Criterio de decisión	Peso relativo	SISTEMA DE TRATAMIENTO							
		Lodos activados convencional		Reactores discontinuos secuenciales (SBR)		Reactores biológicos de lecho móvil (MBR)		Sistema humedales artificiales	
		Puntaje (1-5)	Puntaje total	Puntaje (1-5)	Puntaje total	Puntaje (1-5)	Puntaje total	Puntaje (1-5)	Puntaje total
Costos de construcción	5	3	15	3	15	3	15	5	25
Costos de mantenimiento	5	3	15	3	15	3	15	5	25
Tolerancia a caudales altos o bajos	5	3	15	5	25	3	15	1	5
Calidad del efluente de salida	5	3	15	5	25	3	15	3	15
Requerimiento mínimo de área	5	5	25	5	25	5	25	1	5
Seguridad laboral	5	3	15	3	15	3	15	5	25
Experiencia comprobada	5	5	25	5	25	5	25	3	5
Mínimos riesgos de rendimiento	5	3	15	5	25	3	15	1	5
Cantidad de biosólidos	5	3	15	3	15	3	15	5	25
Requerimientos mínimo de energía	3	3	9	3	9	3	9	5	15
Problemas potenciales por condiciones atmosféricas	3	5	15	5	15	5	15	1	3
Simplicidad operacional	3	3	9	3	9	3	9	5	15
Capacidad de expansión modular	3	3	9	5	15	5	15	1	3
Facilidad para mejorar procesos	3	3	9	3	9	3	9	3	9
TOTAL			206		242		212		190

Elaboración propia con base en Metcalf & Eddy INC., 1995; Huartos Toro, 2018; Rodríguez Miranda, et al., 2015

4.5 Diseño básico conceptual del sistema de tratamiento.

Se han desarrollado varias innovaciones en procesos y equipos en los sistemas de tratamiento por medio de reactores discontinuos secuenciales (SBR). Sin embargo, todos estos sistemas cuentan con tres componentes principales: 1) tanque homogeneizador y/o tamiz 2) reactor biológico y 3) tanque de acondicionamiento del efluente.

De acuerdo con información aportada por fabricantes locales de tecnologías especializadas en el tratamiento de aguas, este tipo de sistemas tienen costos que oscilan entre 1 000 000-1 600 000 pesos. El material del reactor generalmente es de fibra de carbono, cuentan con 10 años de garantía y aseguran que el efluente cumple lo especificado en la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Con base en la metodología propuesta por Crites & Tchobanoglous, 2000, Von Sperling, 2007 y Eckenfelder, 1970 se determinaron los siguientes parámetros básicos de diseño: 1) Generación diaria y mensual de lodos primarios; 2) Volumen del tanque de homogeneización; 3) Volumen del reactor biológico; 4) Generación diaria y mensual de lodos secundarios; 5) Tiempo de cada ciclo 6) Costos por disposición de lodos.

Los datos del proyecto corresponden a los de la **Tabla 14**, mientras que el resumen de los calculos se indican en la **Tabla 15**. Finalmente la representación gráfica del sistema de tratamiento corresponde al de la **Figura 1**.

Tabla 14 Datos del proyecto

Abreviatura	Parámetro	Valor
Q_{MAX}	Caudal máximo diario	15.46 m ³
Q_{MIN}	Caudal mínimo diario	8.03 m ³
Q_{MED}	Caudal medio diario	11.00 m ³
m	Numero de ciclos	3 ciclos al día
θ	Tiempo de retención hidráulica	0.33 días (8 horas)
S_o	DBO ₅ afluente	247 mg / L
S	DBO ₅ deseable	20 mg / L
SNF	Solidos no filtrables	127.9 mg / L
X	Sólidos suspendidos volátiles de licor mezclado (SSVLM)	2 500 mg/L (Von Sperling, 2007)
Y	Coeficiente máximo de rendimiento	0.6 (Crites & Tchobanoglous, 2000)
K_d	Coeficiente de decaimiento endógeno	0.055 d (Crites & Tchobanoglous, 2000)
$COST_{RME}$	Costo por kg de residuo de manejo especial	3.5 pesos
$COST_{RP}$	Costo por kg de residuo peligroso	5.0 pesos

Fuente Elaboración propia

a) Generación diaria y mensual de lodos primarios

La generación de lodos primarios (*Lodo prim*) provenientes del sistema de tamizado y homogeneización es de:

$$Lodo\ prim = (SNF)(Q)$$

$$Lodo\ prim = (127.9\ mg/L)(11\ 000\ L/día)$$

$$Lodo\ prim = (127.9\ mg/L)(11\ 000\ L)$$

$$Lodo\ prim = 1.40\ kg/día \quad o \quad 42\ kg/mes$$

b) Volumen del tanque homogeneizador

Tomando en consideración el caudal máximo registrable de la organización bajo estudio, se propone un tanque de homogeneización con capacidad de 15 m³, el cual pueda amortiguar la carga de hasta un día de operaciones en caso de realizar mantenimiento preventivo o correctivo en el reactor biológico.

c) Volumen del reactor biológico

El tiempo medio de retención celular o edad de lodos (θ_c) es:

$$\theta_c = \frac{\theta \cdot X}{Y(S_0 - S) - \theta \cdot X \cdot kd}$$

$$\theta_c = \frac{0.33 \cdot 2\ 500}{0.6(247 - 20) - 0.33 \cdot 2\ 500 \cdot 0.055}$$

$$\theta_c = 9.08\ días$$

El volumen de agua residual para cada ciclo (V_{CICLO}), equivale a:

$$V_{CICLO} = \frac{Q_{MED}}{m}$$

$$V_{CICLO} = \frac{11}{3}$$

$$V_{CICLO} = 3.6\ m^3$$

En tanto que, la fracción biodegradable (*fb*) de los sólidos suspendidos volátiles de licor de mezcla presentes en el reactor biológico, equivale a:

$$fb = \frac{0.8}{1 + 0.2 \cdot kd \cdot \theta_c}$$

$$fb = \frac{0.8}{1 + 0.2 \cdot 0.055 \cdot 9}$$

$$fb = 0.728$$

De esta forma, el volumen de reacción (V_{REAC}) es igual a:

$$V_{REAC} = \frac{Y \cdot \theta_c \cdot V_{CICLO} \cdot (S_0 - S)}{X \cdot (1 + fb \cdot kd \cdot \theta_c)}$$

$$V_{REAC} = \frac{0.6 \cdot 9 \cdot 3.6 \cdot (247 - 20)}{2500 \cdot (1 + 0.728 \cdot 0.055 \cdot 9)}$$

$$V_{REAC} = 1.30 \text{ m}^3$$

Por otra parte, el volumen de transición (V_{TRANS}) o de seguridad equivale a:

$$V_{TRANS} = 0.1 \cdot V_{CICLO}$$

$$V_{TRANS} = 0.1 \cdot 3.6$$

$$V_{TRANS} = 0.36 \text{ m}^3$$

Finalmente, el volumen total del reactor (V_{TOTAL}) es de:

$$V_{TOTAL} = V_{REAC} + V_{CICLO} + V_{TRANS}$$

$$V_{TOTAL} = 1.30 + 3.6 + 0.36$$

$$V_{TOTAL} = 5.26 \text{ m}^3$$

d) Generación de lodos secundarios

La remoción de DBO_5 en el caudal (SrQ) es de:

$$SrQ = (S_0 - S)(Q)$$

$$SrQ = (247 \text{ mg/L} - 20 \text{ mg/L}) (3600 \text{ L/ciclo})$$

$$SrQ = 0.81 \text{ kg DBO/ ciclo}$$

Por tanto, la eficiencia (E) del proceso es de:

$$E = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100$$

$$E = \frac{247 - 20}{247} \cdot 100$$

$$E = 91.9\%$$

La velocidad específica de utilización del sustrato (U) es de:

$$U = \frac{S_0 - S}{\theta X}$$

$$U = \frac{247 - 20}{9 \cdot 2500}$$

$$U = 0.27 \text{ mg DBO/mg SSV día}$$

Mientras que, el rendimiento observado (Y_{obs}) es igual a:

$$Y_{obs} = \frac{(YU - kd)}{U}$$

$$Y_{obs} = \frac{(0.6 \cdot 0.27 - 0.055)}{0.27}$$

$$Y_{obs} = 0.400 \text{ mg SSV/mg DBO}$$

De esta forma, la producción de sólidos secos (P_X) diarios y mensuales es de:

$$P_X = Y_{obs} \cdot Q_{MED} \cdot (S_0 - S)$$

$$P_X = 0.400 \cdot 11.6 \cdot (247 - 20)$$

$$P_X = 0.999 \text{ kg/día o } 29.97 \text{ kg/mes}$$

Infiriendo que los sólidos tienen un índice volumétrico es de 150 mL/g de sólidos, o bien $0.15 \frac{m^3}{kg}$. El volumen de lodos ($Vol P_X$) equivale a:

$$Vol Px = 0.15 (P_x)$$

$$Vol Px = 0.150 (0.999)$$

$$Vol Px = 0.149 m^3 \text{ al día o } 149.85 L \text{ al día}$$

$$Vol Px = 4\ 495.5 L \text{ al mes}$$

e) Tiempo de los ciclos

La duración de cada fase del ciclo se distribuye de a siguiente forma de acuerdo con los porcentajes recomendados por EPA, 1993.

Llenado	23.8%	1h 54 min
Llenado con mezclado	11.9%	57 min
Llenado con aireación	11.9%	57 min
Reacción (aireación)	11.9%	57 min
Sedimentación	16.7%	1h 20 min
Drenado	11.9%	57 min
Reposo	11.9%	57 min
TOTAL	100%	8 h

f) Costos por disposición de lodos

Los costos mensuales por disposición de los lodos primarios como residuo de manejo especial y residuo peligroso son:

$$Cost \text{ Lodo prim} = 42 \frac{kg}{mes} \times 3.5 \text{ pesos}$$

$$Cost \text{ Lodo prim} = 42 \frac{kg}{mes} \times 5 \text{ pesos}$$

$$Cost = 147 \text{ pesos como residuo de manejo especial y } 210 \text{ como residuo peligroso}$$

Los costos mensuales por disposición de lodos secundarios como residuo de manejo especial siempre que sea deshidratado y estabilizado son:

$$Cost \text{ Lodo sec} = 29.97 \frac{kg}{mes} \times 3.5 \text{ pesos}$$

$$Cost \text{ Lodo sec} = 104 \text{ pesos al mes}$$

En caso de no realizarse la deshidratación y estabilización de lodos, los costos mensuales aumentan significativamente debido al alto porcentaje de agua presentes en ellos, de esta forma, los costos son:

$$\text{Cost Lodo sec humedo} = \text{Vol Px} \cdot 5 \text{ pesos}$$

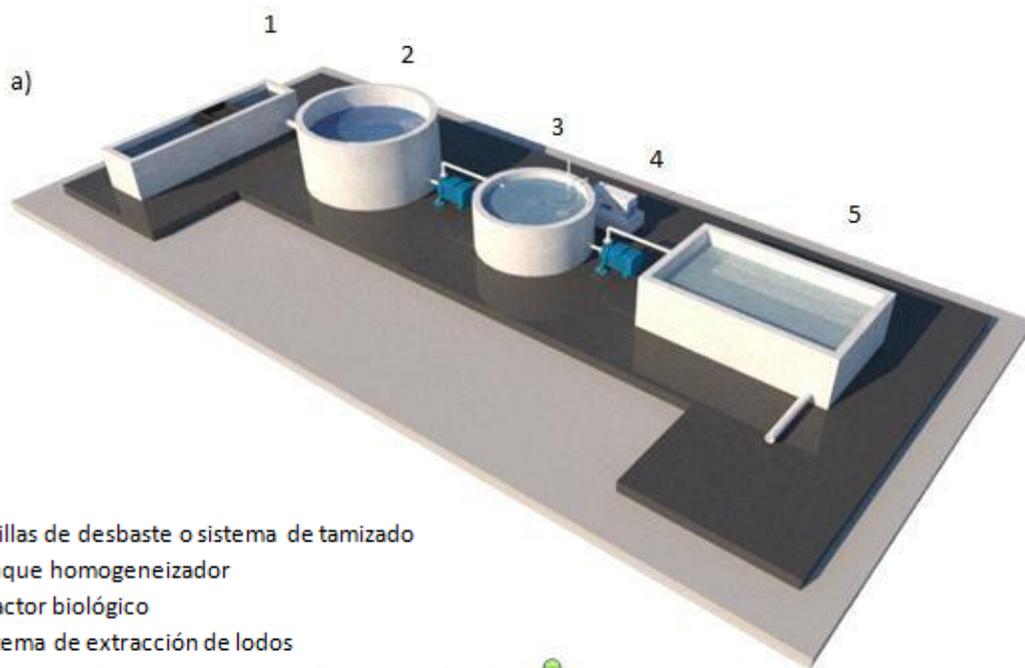
$$\text{Cost Lodo sec humedo} = 4\,495.5 \text{ litros al mes} \cdot 5 \text{ pesos}$$

$$\text{Cost Lodo sec humedo} = 22\,477 \text{ pesos al mes}$$

Tabla 15 Resumen de cálculos del proyecto

Parámetro	Resultado
Lodos primarios generados al día	1.04 kg
Lodos primarios generados al mes	42 kg
Volumen tanque homogeneizador	15 m ³
Caudal por ciclo	3.6 m ³ día
Edad de los lodos	9 días
Volumen reactor biológico	5.26 m ³
Volumen de la reacción	1.30 m ³
Eficiencia del proceso	91.9%
Kilogramos de sólidos al día	0.999 kg/día
Kilogramos de sólidos al mes	29.97 kg/mes
Volumen de lodos al día	149.85 L
Volumen de lodos al mes	4 495.5 L
Duración total del ciclo	8 horas
Llenado	1 hora 54 min
Llenado con mezclado	57 min
Llenado con aireación	57 min
Reacción (aireación)	57 min
Sedimentación	1 hora 20 min
Drenado	57 min
Reposo	57 min
Costo mensual por disposición de lodos primarios	147 pesos
Costo mensual por disposición de lodos secundarios seco	104 pesos
Costo mensual por disposición de lodos secundarios húmedos	22 477 pesos

Fuente Elaboración propia



- 1 Rejillas de desbaste o sistema de tamizado
- 2 Tanque homogeneizador
- 3 Reactor biológico
- 4 Sistema de extracción de lodos
- 5 Tanque de almacenamiento de efluente clarificado

b)



- 1 Rejillas de desbaste o sistema de tamizado
- 2 Tanque homogeneizador
- 3 Reactor biológico
- 4 Sistema de extracción de lodos
- 5 Tanque de almacenamiento de efluente clarificado

Figura 34 a) esquema general de una planta con SBR b) esquema general de una planta con SBR corte transversal (Elaboración propia)

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A lo largo de la realización del proyecto se encontró que:

- El 97 % del caudal de aguas residuales de la empresa son de tipo sanitario, en tanto que el 3 % corresponde a procesos productivos como el lavado de equipo de protección personal, pisos y maquinaria de las distintas unidades de producción.
- La mayor aportación al caudal de aguas residuales de la empresa proviene del área de servicios sanitarios, particularmente de las regaderas, a pesar de que estas son de tipo ecológico. Sin embargo, cabe de destacar que la implementación de estos dispositivos ha reducido el consumo de agua de hasta 6 000 m³/año, según lo reportado por ingenieros de la empresa.
- De manera general, la composición del agua residual de la empresa es muy similar a la composición de un agua residual doméstica.
- Las concentraciones de nitrógeno se clasifican como “fuertes” características de un agua típica residual doméstica, lo cual no es un problema reciente, ya que durante los últimos ocho años esta tendencia se ha hecho presente.
- En los últimos años, las altas concentraciones de sustancias activas al azul de metileno, han sido recurrentes y cuyas aportaciones más significativas provienen del agua residual de procesos tanto externos como internos, debido los tensoactivos presentes en la materia prima utilizada en la formulación de producto.
- El sistema de pre tratamiento de aguas residuales necesita de especial atención en la Fosa 4, es decir, aquella que recibe la aportación de la unidad de proceso 7, puesto que la concentración de sustancias activas al azul de metileno se incrementa, lo cual supone que el sistema de pre tratamiento no está cumpliendo eficientemente su función.
- La atención para un sistema de tratamiento se debe enfocar en el agua sanitaria de la compañía debido a sus características físico-químicas, pero sobre todo por aportar el 97 % al caudal de aguas residuales de la compañía.
- La propuesta de un sistema de tratamiento de aguas residuales por medio de un reactor biológico secuencial (SBR), es la mejor alternativa para el tratamiento de efluentes de la compañía debido a su tolerancia a caudales muy altos o bajos, la calidad del efluente de salida y los mínimos riesgos de rendimiento, principalmente.
- Si bien los costos de instalación de un sistema tratamiento de aguas residuales por medio de un reactor biológico secuencial (SBR) son elevados, los costos de operación son bajos, siempre que se realicen procesos de deshidratación y estabilización de lodos.
- El caudal tratado puede ser incorporado para el mantenimiento de áreas verdes y lavado de unidades operativas y no operativas.
- El tratamiento *in situ* del agua residual permitiría el cumplimiento regulatorio y la disminución de la huella hídrica de la organización de estudio, además de que hace evidente el compromiso de la compañía con el medio ambiente, principalmente con la comunidad más próxima.

En caso de llevarse a cabo la implementación de la propuesta se sugiere:

- La instalación del sistema de tratamiento sea lo más próximo a la conexión con el colector de aguas residuales de la empresa externa a fin de reducir costos por re-ubicación de tuberías y drenajes.
- Se refuercen los procedimientos de operación y mantenimiento de las fosas de pre-tratamiento de aguas residuales y de ser necesario, explorar otras alternativas de tratamiento aprovechando la infraestructura con la que ya se cuenta.
- Se recomienda reforzar las auditorías ambientales internas en la Fosa 4 y el área de procesos 7 así como las políticas de cero derrames a fin de evitar la entrada innecesaria de producto en el efluente de la planta.
- Se sugiere que la promoción de la limpieza en seco de equipo de protección personal, unidades de producción y maquinaria, siempre que sea posible y previo análisis de riesgo laboral, a fin de disminuir el caudal de aguas residuales de procesos productivos.
- Finalmente, se sugiere que el sistema de tratamiento se dé a conocer con la comunidad laboral a fin de explicar su funcionamiento y que incluso, pueda servir como un medio para promover la educación ambiental en la compañía.

Como conclusión del presente proyecto, el objetivo y la hipótesis se cumplen ya que la implementación de esta propuesta permitirá prevenir, reducir y controlar la contaminación del agua de forma significativa en la organización de estudio debido a que se trata de un sistema con experiencia comprobada acorde a las características específicas de la organización que hasta antes del proyecto no se tenía conocimiento.

6. REFERENCIAS

Aguamarket, 2019. *Catálogo de productos*. [En línea] Disponible en: <https://www.aguamarket.com/productos/> [Último acceso: 7 Julio 2019].

Aguirre Jimenez, A., 1995. *Administración estratégica del agua y su implementación a través de agentes de cambio internos. Un enfoque para el estado de Jalisco*. Tesis de Maestría: Centro Universitario de Ciencias Económico Administrativas-Universidad de Guadalajara.

AINIA, 2012. *5 ventajas que aporta la oxidación avanzada en el tratamiento de aguas*. [En línea] Disponible en: <https://www.ainia.es/tecnoalimentalia/tecnologia/5-ventajas-que-aporta-la-oxidacion-avanzada-en-el-tratamiento-de-aguas/> [Último acceso: 18 Mayo 2019].

Alianza por el agua, 2016. *Compendio de tecnologías y sistemas de saneamiento*. [En línea] Disponible en: <http://alianzaporelagua.org/Compendio/tecnologias/> [Último acceso: 7 Julio 2019].

Angehrn, M., 1986. Ultraviolet desinfection of water. *Aqua*, Volumen 2, pp. 109-115.

Barrenechea Martel, A., 2005. *Coagulación*. [En línea] Disponible en: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/cuatro.pdf> [Último acceso: 12 Mayo 2019].

Bitton, G., 1994. *Waste water microbiology*. New York: J. Wiley & Sons Inc.

Buitrón Méndez, G., Reino Sanchez, C. & Carrera Muyo, J., 2018. *Manual técnico sobre tecnologías biológicas aplicadas al tratamiento de aguas residuales industriales*. Primera ed. Madrid: CYTED.

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2019. *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. [En línea] Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/cpeum.htm> [Último acceso: 4 Julio 2019].

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2016. *Ley de Aguas Nacionales*. [En línea] Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lan.htm> [Último acceso: 4 Julio 2019].

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2018. *Ley Federal de Derechos*. [En línea] Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lfd.htm> [Último acceso: 4 Julio 2019].

Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2018. *Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. [En línea]

Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgeepa.htm>
[Último acceso: 4 Julio 2019].

CanariaAqua, 2013. *Filtrado por ósmosis inversa en Tenerife*. [En línea]
Disponible en: <https://canariaqua.com/osmosis-inversa/filtrado-de-agua-por-osmosis-inversa-en-tenerife/>
[Último acceso: 6 Julio 2019].

CAR Cundinamarca, 2011. *Información compilada de los Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Disponibles y Aplicables al Proyecto*. [En línea]
Disponible en: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5aec916f61396.pdf>
[Último acceso: 14 Mayo 2019].

Cárdenas, C. y otros, 2006. Remoción de nutrientes en un reactor discontinuo secuencial. *Interciencia*, 31(11), p. 787.793.

CIDTA, 1998. *IVL*. [En línea]
Disponible en: http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/CURSO/UNI_05/u5c6s8.htm
[Último acceso: 6 Julio 2019].

CIDTA, 1999. *Rejillas de desbaste de limpieza manual*. [En línea]
Disponible en: http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/CURSO/UNI_03/u3c2s2.htm
[Último acceso: 6 Julio 2019].

CIDTA, 2004. *Investigando el tratamiento del agua. Sedimentación*. [En línea]
Disponible en: http://cidta.usal.es/cursos/agua/modulos/Conceptos/uni_04/u5c3s1.htm
[Último acceso: 18 Mayo 2019].

CONAGUA, 2016. *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas potabilizadoras de tecnología simplificada*. [En línea]
Disponible en: <http://www.mapasconagua.net/libros/SGAPDS-1-15-Libro24.pdf>
[Último acceso: 18 Noviembre 2018].

CONAGUA, 2018. *Estadísticas del agua en México*. [En línea]
Disponible en: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM2018.pdf>
[Último acceso: 7 Febrero 2019].

Crites, R. & Tchobanoglous, G., 2000. *Tratamiento biológico y remoción de nutrientes*. Bogotá: McGraw-Hill Interamericana.

Dautan, R. y otros, 1988. *Diseño y construcción de un reactor discontinuo secuencial para remoción de DBO.*, Lima: Ponencia presentada en el XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

Eckenfelder, W. W., 1970. *Water Quality Engineering for Practicing Engineers*. New York: Barnes & Noble.

El agua potable, 2019. *Flotación-Decantación*. [En línea] Disponible en: <http://www.elaguapotable.com/decantacion.htm> [Último acceso: 6 Julio 2019].

EPA, 1974. *Process Design Manual for Upgrading Existing Wastewater Treatment Plants*. [En línea] Disponible en: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/20007T66.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=Prior+to+1976&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&> [Último acceso: 9 Febrero 2019].

EPA, 2017. *Usando el agua eficientemente: ideas para la industria*. [En línea] Disponible en: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-02/documents/ws-ourwater-industry-spanish.pdf> [Último acceso: 21 Agosto 2018].

Fair, G., 1968. *Abastecimiento de aguas y remoción de aguas residuales*. Ciudad de México: Limusa.

Fernández, J. & Curt, M. D., 2005. *Métodos analíticos para aguas residuales*. [En línea] Disponible en: <https://www.fundacionglobalnature.org/macrophytes/documentacion/Cap%EDtulos%20Manual/Cap%EDtulos%20Anexos1.pdf> [Último acceso: 7 Julio 2019].

Forero, J., Díaz, J. & Blandón, V., 1999. DISEÑO DE UN NUEVO SISTEMA DE FLOTACIÓN PARA TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 1(5), pp. 67-75.

González A., Z. I. & otros, y., 2010. *Estudio del curso alto del río Lerma desde una perspectiva sustentable*, México: ININ. [En línea] Disponible en: www.inin.gob.mx [Último acceso: 7 Febrero 2019].

Grady C., P. L. & Lim, H., 1980. *Biological Wastewater Treatment: Theory and Application*,. New York: s.n.

Gunt, 2010. *Oxidación química*. [En línea] Disponible en: https://www.gunt.de/images/download/chemical-oxidation_spanish.pdf [Último acceso: 28 Mayo 2019].

Hammer, M., 2012. *Water and wastewater technology*. USA: Prentice Hall.

Hazen y Sawyer, 2011. *Memoria técnica de la selección justificada de tres sistemas de tratamiento viables*. [En línea]
Disponible en: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5aec91983d9dd.pdf>
[Último acceso: 14 Mayo 2019].

Hernandez, A., 1992. *Depuración de aguas residuales*. Primera ed. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos.

Huartos Toro, J. A., 2018. *Análisis comparativo de tecnologías aerobias para el tratamiento de aguas residuales urbanas*. Primera ed. Manizales: Universidad Católica de Manizales.

Huescas, J. C., 2013. *Guías técnicas y económicas para la selección y diseño de plantas de tratamiento de agua*. Primera ed. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional.

iAgua, 2012. *Los humedales artificiales*. [En línea]
Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/carolina-miguel/los-humedales-artificiales-componentes-y-tipos>
[Último acceso: 18 Mayo 2019].

IMTA, 1996. *Alternativas de tratamiento de aguas residuales*. Segunda ed. Ciudad de México: IMTA.

Kadlec, R. & Kinght, R., 1996. *Treatment Wetlands*. New York: Lewis Publishers.

Khemis, M. y otros, 2005. Electrocoagulation for the treatment of oil suspensions: relation between the electrode generations and the waste content.. *Process Safety and Environmental Protection*, 83(B1), pp. 50-57.

Koshland Science Museum, 1999. *Coagulación-Floculación*. [En línea]
Disponible en: https://www.koshland-science-museum.org/water/flash/es/water.html?_3_08_02
[Último acceso: 7 Julio 2019].

Lambarri Beléndez, J. & Vázquez del Mercado Arribas, R., 2017. Huella Hídrica: Definición y contexto global. En: *Huella Hídrica en México análisis y perspectivas*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, p. 13.

Lambert, R. A., 1975. *Parasitología: identificación de helmintos*. Mexico: Mexico: El manual moderno.

Larrea, L., 2004. *Ventajas y aplicaciones de la tecnología de lecho móvil en aguas residuales urbanas e industriales*. Guipúzcoa: Universidad de Navarra.

Lenntech, 2010. *Oxidación avanzada*. [En línea]
Disponible en: <https://www.lenntech.es/oxidacion-avanzada.htm#ixzz5ooGcv7gS>
[Último acceso: 18 Mayo 2019].

Levine, A. D., Tchobanoglous, G. & Asano, T., 1985. Characterization of the Size Distribution of Contaminants in Wastewater: Treatment and reuse implication. *Journal WPCF*, 57(7).

Limón Macías, J. G., 2013. *Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales ¿problema o recurso?*. [En línea] Disponible en: http://www.ai.org.mx/ai/images/sitio/201309/ingresos/jglm/doc_ingreso_gualberto_limon_trabajo_de_ingreso.pdf [Último acceso: Mayo 18 2019].

Metcalf & Eddy INC., 1995. *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. Tercera ed. Aravaca(Madrid): McGraw-Hill.

Muñoz Paredes, J. F. & Ramos, R. M., 2014. Reactores discontinuos secuenciales: Una tecnología versátil en el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 1(24), pp. 49-66.

Muñoz Cruz, A., 2008. *Caracterización y tratamiento de aguas residuales*. Primera ed. Mineral de la Reforma, Hidalgo: UAEH.

Nexom, 2019. *Bioportz*. [En línea] Disponible en: <https://nexom.com/bioportz> [Último acceso: 7 Julio 2019].

Pelczar, M. J. & Chan, E. C., 1986. *Microbiology*. Quinta ed. New York: McGraw-Hill.

Ramalho, R. S., 1996. *Tratamiento de aguas residuales*. Primera ed. Barcelona: Editorial Reverté S.A de C.V.

Ramírez, C. E., 2004. *Fundamentos teóricos de lodos activados y aereación extendida*. [En línea] Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018834/MEMORIAS2004/Capituloll/1Fundamentosdelprocesodelodosactivados.pdf> [Último acceso: 18 Mayo 2019].

RAS, 2000. *Tratamiento de aguas residuales*. Bogotá: Ministerio de Desarrollo Económico.

Rodríguez Fernández-Alba, A. y otros, 2006. *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. 2 ed. Madrid: CITME. Universidad de Alcalá.

Rodríguez Miranda, J. P., García Ubaque, C. A. & Pardo Pinzón, J., 2015. Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Tecnura*, 19(46), pp. 149-164.

Romero Rojas, J. A., 2000. *Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización*. Primera ed. México: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR.

Rushton, J. H., 1952. Mixing of Liquids in Chemical Processing. *Ind. Eng. Chem*, 44(12).

Saavedra, A. & Romero, J., 1999. *Universidad de Santiago de Chile. Depto de Ingeniería Química*. [En línea]

Disponible en: <http://ambiente.usach.cl/jromero/imagenes/GUIAS%20MEMBRANA/Documento%201%20Antecedentes%20generales%20sobre%20membranas.pdf>.

[Último acceso: 6 Julio 2019].

Sander, E. d. R., Jaap, H., Van, D. G. & Jan, G., 1994. Bubble size in flotation thickening. *Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Water Management*, pp. 465-473.

SCFI, 2001. *NMX-AA-050-SCFI-2001. Determinación de fenoles totales en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas*. [En línea]

Available at: <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa050-01.pdf>

[Último acceso: 8 Octubre 2018].

Secretaría de Economía, 1980. *Catálogo de Normas Mexicanas*. [En línea]

Disponible en: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normasmx/detallenorma.nmx?clave=NMX-AA-003-1980>

[Último acceso: 4 Julio 2019].

Secretaría de Economía, 1996. *Catálogo de Normas Oficiales Mexicanas. NOM-001-SEMARNAT-1996*. [En línea]

Disponible en: <http://www.economia-noms.gob.mx/noms/detalleXNormaAction.do>

[Último acceso: 5 Julio 2019].

Secretaría de Economía, 1996. *Catálogo de Normas Oficiales Mexicanas. NOM-002-SEMARNAT-1996*. [En línea]

Disponible en: <http://www.economia-noms.gob.mx/noms/detalleXNormaAction.do>

[Último acceso: 4 Julio 2019].

Secretaría de Economía, 1997. *Catálogo de Normas Oficiales Mexicanas NOM-003-SEMARNAT-1997*. [En línea]

Disponible en: <http://www.economia-noms.gob.mx/noms/detalleXNormaAction.do>

[Último acceso: 5 Julio 2019].

Secretaría de Economía, 2002. *Catálogo de Normas Oficiales Mexicanas. NOM-004-SEMARNAT-2002*. [En línea]

Disponible en: <http://www.economia-noms.gob.mx/noms/detalleXNormaAction.do>

[Último acceso: 4 Julio 2019].

Secretaría de Economía, 2005. *Catálogo de Normas Oficiales Mexicanas. NOM-052-SEMARNAT-2005*. [En línea]

Disponible en: <http://www.economia-noms.gob.mx/noms/detalleXNormaAction.do>

[Último acceso: 4 Julio 2019].

Secretaría de Economía, 2011. *Catálogo de Normas Oficiales Mexicanas. NOM-161-SEMARNAT-2011.* [En línea]

Disponible en: <http://www.economia-noms.gob.mx/noms/detalleXNormaAction.do>
[Último acceso: 4 Julio 2019].

Stacque, 2019. *Sequencing batch reactors (SBR).* [En línea]

Disponible en: <https://www.stacque.com/en/impianti/wastewater-treatment/reactors-discontinuous-cycle-sbr>
[Último acceso: 7 Julio 2019].

Standard Methods, 1989. *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water.* 17 ed. s.l.:American Public Health Association.

Strickland , T. J., 1980. Laboratory Results of Cleaning Produced Water by Gas Flotation. *SPE Journal*, pp. 175-190.

Tebbutt, T., 1991. *Elementos de control de la calidad del agua.* Primera ed. Ciudad de México: Limusa Noriega Editores.

Teorema Ambiental, 2006. *Antecedentes de la contaminación del agua.* [En línea]

Disponible en: <http://www.teorema.com.mx/agua/antecedentes-de-la-contaminacion-del-agua/>
[Último acceso: 5 Julio 2019].

Toapanta Vera, M. I., 2007. *Grasas y aceites.* [En línea]

Disponible en: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/.../2/GRASASYACEITES.doc>
[Último acceso: 2 Septiembre 2018].

Tomasini Ortiz, A. C., 2004. *Serie autodidáctica en materia de normas técnicas relacionadas con la inspección y verificación.* [En línea]

Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12013/1180>
[Último acceso: 2 Septiembre 2018].

UDLAP, 2005. *Dureza del agua.* [En línea]

Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/valenzuela_m_td/capitulo3.pdf
[Último acceso: 15 Septiembre 2018].

UJAEN, 2007. *Análisis de aguas.* [En línea]

Disponible en: http://www4.ujaen.es/~mjayora/docencia_archivos/Quimica%20analitica%20ambiental/tema%2010.pdf
[Último acceso: 30 Septiembre 2018].

Universidad de Salamanca, 2003. *Caracterización del agua residual. Características químicas.* [En línea]

Disponible en:
http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/curso/uni_03/u3c3s6.htm.
[Último acceso: 6 Julio 2019].

Von Spelling, M., 1996. Comparison among the most frequently used systems for wastewater treatment in developing countries. *Water science and technology*, pp. 156-180.

Von Sperling, M., 2007. *Activated Sludge and Aerobic Biofilm Reactors*. Primera ed. New Delhi: IWA Publishing.

Water Pollution Control Federation, 1988. *Wastewater Treatment Plant Design. Manual of Practice*. Preliminary Draft ed. s.l.:s.n.

We Are Water Foundation, 2017. *Aguas negras, el rastro de nuestra historia*. [En línea] Disponible en: https://www.wearewater.org/es/aguas-negras-el-rastro-de-nuestra-historia_281141
[Último acceso: 5 Julio 2019].

Yañez, F., 1995. *Lagunas de estabilización*. Lima: Centro Panamericano de ingeniería sanitaria y ambiental.