

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPTO. DE RIEGO Y DRENAJE



**EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE LODOS ACTIVADOS EN
LA PTAR-HACIENDA NARRO Y SU USO AGRÍCOLA**

POR
JOSÉ CLAUDIO PÉREZ DELGADO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

BUENAVISTA, SALTILLO, COAH. MÉXICO.

NOVIEMBRE DE 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPTO. DE RIEGO Y DRENAJE

**EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE LODOS ACTIVADOS EN
LA PTAR HACIENDA NARRO Y SU USO AGRÍCOLA**

POR

JOSÉ CLAUDIO PÉREZ DELGADO

TESIS

**QUE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

Dra. Manuela Bolívar Duarte

Asesor principal

Ing. Rolando A. Sandino Salazar

Coasesor

M.C. Luis Edmundo Ramírez R.

Coasesor

M.C. Sergio Sánchez Martínez

Coordinador de la División de Ingeniería

Agradecimientos

A mi familia por el apoyo brindado en cada momento desde el inicio hasta el final de la terminación de la carrera. Cada uno de Ellos ha sido una pieza fundamental para llegar aquí y les estaré eternamente agradecido.

A la Universidad por darme la oportunidad de salir como un ingeniero y darme las bases para construir un futuro prometedor, gracias por todo lo brindado.

A la Doctora Manuelita por el apoyo brindado en la realización de esta tesis y su apoyo durante mi estancia en la Universidad.

A la QFB Paola por el apoyo durante los análisis de las muestras.

A mi gran amigo Francisco González por su apoyo y por su grata amistad. Es una persona que me ha dado grandes consejos y muy buenos momentos.

A mi amiga y compañera Martha Vidal por su apoyo a lo largo de la carrera, por los buenos momentos vividos, su gran amistad.

A mis compañeros y amigos en general, de los cuales aprendí varias cosas y pasé buenos momentos.

Dedicatoria

Este logro se lo dedico a mi madre † Yolanda Delgado Juárez con todo el amor del mundo, ya que gracias a ella me encuentro en el lugar donde estoy y que, aunque no esté conmigo, sé que desde el cielo está celebrando este gran triunfo. Siempre la llevaré en mi corazón y la amaré infinitamente.

A mi padre José Claudio Pérez Colmenero por enseñarme tantas cosas y brindarme tantas enseñanzas y que, a pesar de todas las cosas vividas, sé que es un gran hombre que quiero y respeto.

A mis Hermanos Luis Ángel, Jorge, Carlos y Juan Diego y mis hermanas Patricia, María del Carmen y María Guadalupe por todo el apoyo brindado y saben que sin su apoyo no hubiese sido fácil estudiar la Universidad. Cada uno de ellos aportó su granito de arena y ahora está rindiendo frutos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Agradecimientos	i
Dedicatoria.....	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos.....	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Disponibilidad del Agua en el Mundo.....	3
2.2. Situación del Agua en México.....	3
2.2.1. Distribución de la Precipitación Pluvial.....	4
2.2.2. Usos del Agua en México.....	6
2.2.3. Agua para Uso Agrícola	6
2.2.4. Grado de Presión sobre el Recurso	6
2.3. Calidad del Agua.....	7
2.3.1. Contaminación del Agua	7
2.4. Tipos de Contaminantes	8
2.4.1. Principales Contaminantes en Agua Residual (AR)	8
2.4.2. Principales Enfermedades Relacionadas con el Agua	10
2.5. Agua Residual.....	11
2.5.1. Origen de las Aguas Residuales y los Desechos	12
2.5.2. Aspectos de las Aguas Residuales	12
2.5.3. Volúmenes de Aguas Residual en México	13
2.6. Tratamiento de Aguas Residuales	15

2.6.1.	Fases del Tratamiento de Aguas Residuales	17
2.6.2.	Tratamiento Preliminar	17
2.6.3.	Tratamiento Primario.....	17
2.6.4.	Tratamiento Secundario o Biológico.....	17
2.6.5.	Tratamiento Avanzado o Terciario	18
2.6.6.	Desinfección.....	18
2.6.7.	Lodos Activados	20
2.6.8.	Reúso de Aguas Residuales	20
2.6.9.	Objetivo Principal del Tratamiento de Agua Residual	20
2.6.10.	Usos Principales del Agua Residual Tratada	21
2.6.11.	Ventajas de Reutilizar el Agua Residual	21
2.6.12.	Desventajas del Agua Residual Tratada	21
2.7.	Normatividad.....	22
2.8	Clasificación Agronómica para Uso Agrícola	23
2.8.1.	Riego Agrícola:.....	23
2.8.2.	Conductividad Eléctrica (CE).....	25
2.8.3.	Salinidad Efectiva (SE).....	25
2.8.4.	Salinidad Potencial (SP).....	25
2.8.5.	Efecto Probable del Sodio Sobre Características Físicas del Suelo.....	25
2.8.6.	Carbonato de Sodio Residual (CSR).....	25
2.9	Contenido de los Elementos Tóxicos para las Plantas	26
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	27
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	42
6.	BIBLIOGRAFIA	43

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Desarrollo histórico en el tratamiento de aguas residuales.....	11
Cuadro 2. Características de las aguas residuales y fuentes de origen.	13
Cuadro 3. Datos geográficos y socioeconómicos por Entidad Federativa	14
Cuadro 4. Estados de la República Mexicana, así como el número de PTAR'S.....	15
Cuadro 5. Procesos de Tratamiento del Agua Residual.	16
Cuadro 6. Tipos de pretratamientos y tratamientos de aguas residuales (Rojas,2002).	19
Cuadro 7. Consideraciones para agua de riego.....	24
Cuadro 8. Criterios para clasificar el agua agronómicamente.....	24
Cuadro 9. Parámetros determinados en el influente.....	34
Cuadro 10. Parámetros determinados en el efluente.....	35
Cuadro 11. Porcentaje de remoción.	36
Cuadro 12. Comparación de los parámetros del efluente con las Normas Mexicanas.	37
Cuadro 13. Cationes.....	40
Cuadro 14. Aniones.....	40
Cuadro 15. Calidad de agua para uso Agrícola.	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proporciones de extracción de agua por Continente.	4
Figura 2. Distribución de la precipitación de la República Mexicana.	5
Figura 3. Usos del agua en México.....	6
Figura 4. Principales procesos de tratamiento.....	14
Figura 5. Localización geográfica PTAR-Hacienda Narro.....	27
Figura 6. Vista panorámica de la PTAR-Hacienda Narro.....	28
Figura 7. Conductivímetro Orión Versastar.....	28
Figura 8. Determinación de Sólidos Totales (ST).	29
Figura 9. Determinación de Sólidos Suspendedos Totales y Volátiles (SST) y (SSV)	30
Figura 10. Sólidos Sedimentables en Cono Imhoff (SS).....	30
Figura 11. Determinación de la DQO.....	31
Figura 12. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅).....	32
Figura 13. Determinación de Grasas y Aceites (G Y A).....	32
Figura 14. Determinación de Coliformes Fecales y Totales (CF) y (CT).....	33
Figura 15. Análisis de calidad del agua.	33
Figura 16. Comparación de DQO y DBO ₅ en el Influyente.....	38
Figura 17. Comparación de DQO y DBO ₅ en el efluente.....	38
Figura 18. Comparación de Sólidos Suspendedos Totales (SST).	39
Figura 19. Comparación de Sólidos Sedimentables Volátiles (SSV).	39
Figura 20. Comparación de Coliformes Fecales (CF).....	40

RESUMEN

El Agua es muy importante debido a que es un elemento vital irremplazable que forma parte de todo ser vivo y se utiliza para la mayoría de las actividades de la vida cotidiana.

El crecimiento de la población y la necesidad del agua para uso doméstico agrícola o industrial genera grandes demandas de este vital líquido, lo que genera grandes cargas contaminantes y que con el paso del tiempo se ha buscado la manera de tratarla y reutilizarla el agua contaminada. Esto ha derivado en que su uso sea cada vez más común en el ámbito agrícola. Sin embargo, el uso del agua residual tratada en este sector, debe cumplir con ciertos parámetros los cuales nos aseguran que dicha agua no afecte a las personas que la utilizan ni a los cultivos que sean irrigados.

El presente trabajo muestra los resultados obtenidos en la PTAR-Hacienda Narro ubicada en el municipio de Saltillo Coah. donde se determinó el porcentaje de remoción de los contaminantes para determinar la eficiencia del tratamiento biológico, así como su calidad para reuso agrícola, bajo los parámetros de la NOM-00-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997, obteniendo un resultado favorable para su utilización en riego agrícola esto bajo ciertas restricciones en cuanto a cultivos y métodos de riego.

Palabras claves: agua residual, tratamiento biológico, contaminantes,
normas mexicanas.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua a nivel mundial es un problema muy serio, ya que debido a factores como el crecimiento de la población, la creación de nuevas industrias o abastecimiento de las ya existentes y la agricultura, por mencionar algunas, han provocado cambios en la calidad del agua, lo que ha derivado en diversos problemas que repercuten en todo el mundo y no por que se agote el recurso hídrico, sino porque cambia la calidad del agua dulce utilizada.

Bien es sabido que la prioridad del recurso hídrico es la población y en segundo lugar la agricultura, ya que de ella depende el alimento de la población sin importar la alta demanda del recurso.

México no queda exento de esta problemática, ya que grandes cantidades de agua se ven afectadas por el uso industrial, doméstico y la agricultura que es un punto muy importante, debido al gran interés y la alta demanda del recurso en donde se utilizan fertilizantes, pesticidas u otros productos que cambian la calidad del agua.

Así que se han buscado alternativas para poder reutilizar el agua dulce que se ha convertido en agua residual y para esto se implementan plantas tratadoras de agua residual (PTAR) para darle un tratamiento especializado y así mejorar la calidad del agua y sea apta para volver a reutilizarla en diferentes sectores y actividades.

Uno de estos sectores es la agricultura en donde se podrían aprovechar algunas características que siguiendo ciertos parámetros establecidos por la ley se pueden utilizar para los cultivos y sin que los

contaminantes afecten al suelo o al subsuelo o ya sea el caso, el agua subterránea.

Así que en el siguiente trabajo analizaremos las características de la PTAR ubicada al Sur de la ciudad de Saltillo en la colonia Hacienda Narro y se determinó la eficiencia de la remoción de los contaminantes durante el proceso y la calidad de agua al final del tratamiento (efluente) para que se cumpla con los parámetros de la norma NOM-003-SEMARNAT-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Por lo anteriormente mencionado se establecieron los siguientes objetivos:

1.1 Objetivos

- Determinar la eficiencia de remoción de los contaminantes del agua residual en el tratamiento biológico.
- Determinar la calidad agronómica del agua tratada cumpliendo con la norma NOM-003-SEMARNAT-1997.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Disponibilidad del Agua en el Mundo

Se calcula que en el planeta existen alrededor de 1400 millones de kilómetros cúbicos de agua de los cuales 2.5 por ciento corresponden a agua dulce, localizada principalmente en ríos, lagos, glaciares, mantos de hielo y acuíferos. Cerca de tres cuartas partes de agua dulce están contenidas en glaciares y mantos de hielo, de los cuales aproximadamente 97 por ciento son prácticamente inaccesibles, pues se encuentran en la Antártida, el Ártico y Groenlandia (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente – PNUMA-, GEMS, 2007).

El sistema mundial de información sobre el agua y la agricultura de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (AQUASTAT) distingue tres tipos de extracciones de agua: agrícolas, municipales (incluyendo la doméstica) e industriales. A nivel mundial las proporciones de extracción son aproximadamente 69 por ciento agropecuaria, 12 por ciento municipal y 19 por ciento industrial. Las proporciones también varían mucho entre regiones y a nivel mundial, la importancia de la extracción del agua agrícola depende en gran medida del clima y del lugar que ocupe la agricultura en la economía (FAO,2020) (Figura 1).

2.2 Situación del Agua en México

El agua se inscribe en la cadena de las necesidades absolutas para la conservación de todas las especies vivientes, es un recurso vital no sustituible y por naturaleza es el elemento más irremplazable de la vida (Rolland y Vega, 2010).

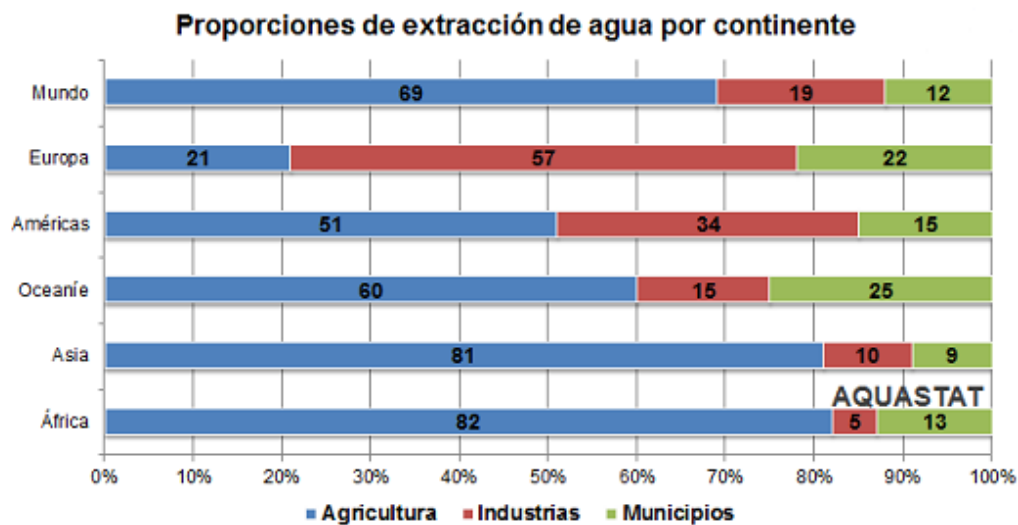


Figura 1. Proporciones de extracción de agua por Continente (FAO, 2020).

México tiene una precipitación promedio anual de 740 mm, cuenta con 653 acuíferos para la administración de aguas subterráneas, de los cuales 105 se encuentran en condición de sobre explotación; 32 con presencia de suelos salinos y agua salobre y 18 con intrusión marina. En cuanto a las aguas superficiales, tiene 757 cuencas para la administración de aguas superficiales, 8 cuencas transfronteriza y 51 ríos. Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas, que para efectos administrativos se agrupan en 13 regiones hidrológico-administrativas (Comisión Nacional del Agua -CONAGUA-, 2018).

2.2.1. Distribución de la Precipitación Pluvial

La distribución geográfica de la precipitación en la República Mexicana está tan íntimamente ligada con la orografía del país como con la distribución de los rasgos más prominentes de la circulación atmosférica. En la mayor parte de la República la temporada lluviosa se presenta en la mitad del año en que se encuentra el verano, es decir, de Mayo a Octubre, excepto en una pequeña área del Noroeste en donde predomina el clima con lluvias en invierno (García, 2003).

Según la autora anterior “La precipitación es más abundante, en general, del lado del Golfo que, del lado del Pacífico, pues mientras la costa del Golfo tiene en una gran extensión en precipitaciones mayores de 2 000 mm, la del Pacífico no recibe más de 2 000 mm sino en sitios aislados. La zona más lluviosa, con precipitaciones superiores a 1 500 mm se encuentra al Sur. La porción noreste de la llanura costera del Golfo de México recibe entre 500 y 1 500 mm de lluvia al año. La parte Norte de la Altiplanicie es una zona enorme de escasa precipitación, su aridez se debe a su situación con respecto a la faja subtropical de alta presión y a la orientación general de las sierras que la limitan y aíslan de los mares; la zona más árida, con menos de 300 mm de lluvia al año, se extiende en la parte Norte central de esta región y abarca desde la frontera con Estados Unidos hasta las inmediaciones del paralelo 24° N.”

En la Figura 2 se muestra la distribución de precipitación en el país para el año 2017, que se presentó de la siguiente manera.

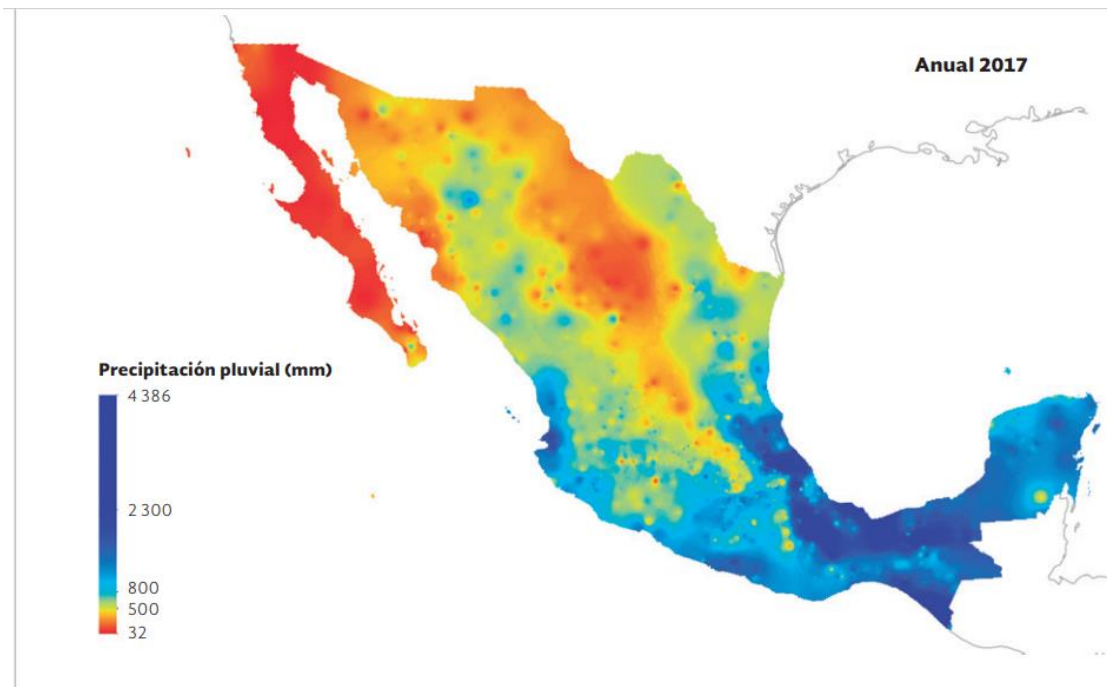


Figura 2. Distribución de la precipitación de la República Mexicana (CONAGUA, 2018).

2.2.2. Usos del Agua en México

Los principales usos del agua en México se dividen de la siguiente manera: agrícola 76.94 por ciento; para el abastecimiento público el 14.38 por ciento, para la industria autoabastecida el 4.8 por ciento y para la energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad 4.72 por ciento como se muestra en la Figura 3.

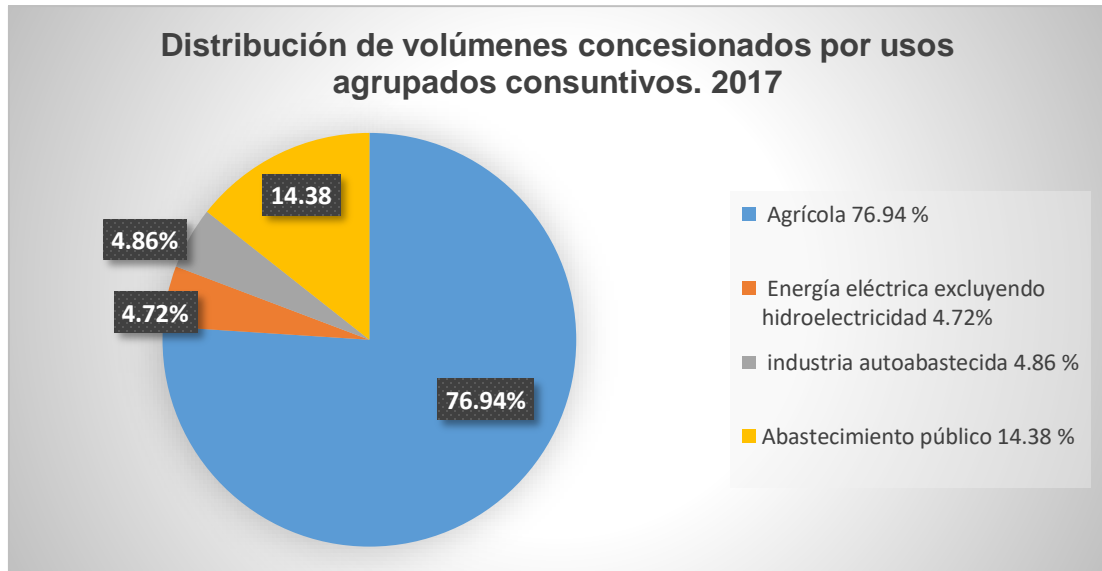


Figura 3. Usos del agua en México (CONAGUA, 2018).

2.2.3. Agua para Uso Agrícola

El mayor uso del agua en México es el agrícola. La superficie sembrada anualmente (considerando el año agrícola y los cultivos perennes, en régimen de riego y temporal) ha variado entre 21.4 y 21.6 millones de hectáreas durante el periodo 2006-2017 (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera –SIAP-, 2017).

2.2.4. Grado de Presión sobre el Recurso

El porcentaje que representa el agua empleada en usos consuntivos respecto al agua renovable es un indicador del grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico en el país, cuenca o región. La escala puede ser de muy

alto, alto, medio, bajo y sin estrés. A escala nacional, México presenta un grado de presión del 19.5 por ciento lo cual se considera bajo; sin embargo, las Zonas Centro, Norte y Noroeste del país experimentan un alto grado de presión (CONAGUA, 2018).

2.3 Calidad del Agua

Los problemas de calidad del agua persisten tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo e incluyen la pérdida de cuerpos de agua de calidad óptima, los impactos asociados con los cambios en la hidromorfología, el aumento de contaminantes emergentes y la propagación de especies invasoras (Organización Mundial de las Naciones Unidas -ONU-, 2018).

La misma fuente menciona que la calidad del agua se determina mediante la caracterización física y química de muestras de agua y de su comparación con normas y estándares de calidad. De esta forma se puede identificar si el agua es idónea para los requerimientos de calidad asociados a un uso determinado. Por ejemplo: el consumo humano o en el ambiente, y en su caso, los eventuales procesos de depuración requeridos para la remoción de elementos indispensables o riesgosos.

El tratamiento de agua tiene que ver con los procesos utilizados para purificar, desinfectar y proteger el agua contra la recontaminación. Por lo general el saneamiento comprende instalaciones dentro y fuera del sitio para la recolección, el transporte, el tratamiento y eliminación de los desechos y garantiza el mantenimiento de unas condiciones higiénicas (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos –WWAR-, 2019).

2.3.1. Contaminación del Agua

Todas las aguas naturales contienen varios contaminantes que provienen de la erosión, la lixiviación y los procesos de la intemperie. A esta contaminación natural, se agrega aquella causada por aguas residuales de origen doméstico o

industrial, que se pueden disponer de varias maneras, por ejemplo, en el mar, en la tierra, en estratos subterráneos o, más comúnmente en aguas subterráneas (Noyola, 2000).

2.4 Tipos de Contaminantes

Para Noyola (2000) los contaminantes se clasifican como:

- No conservativos

Los contaminantes se comportan de diferentes maneras cuando se agregan agua. Estos incluyen a la mayoría de las sustancias orgánicas, algunas sustancias inorgánicas y muchos microorganismos que se degradan por los procesos naturales de auto purificación, de modo que sus concentraciones se reducen con el tiempo. El tiempo de descomposición de estos materiales depende de cada contaminante en particular, la calidad del agua receptora, de la temperatura y de otros factores ambientales.

- Conservativos

Los procesos naturales no afectan a muchas sustancias inorgánicas, por lo que las concentraciones de los contaminantes consecutivos solo pueden reducir por dilución. Por lo regular, los procesos naturales o de tratamiento de aguas no afecta a los contaminantes consecutivos, y su presencia en una fuente de agua limita su uso.

2.4.1. Principales Contaminantes en Agua Residual (AR)

Tipos de contaminantes:

Los contaminantes que afectan la calidad del agua según el autor anterior, también se conocen como contaminantes potenciales y se dividen de la siguiente forma:

- **Compuestos infecciosos y tóxicos:**

Las bacterias son las representativas de los compuestos infecciosos relacionándolas con grandes epidemias, también se encuentran los virus, gusanos y otros organismos patógenos.

- **Materiales que afectan el balance de Oxígeno en el agua:**

Algunos compuestos orgánicos son utilizados por los microorganismos presentes en la corriente como fuentes de energía y crecimiento. El proceso metabólico en estas transformaciones causa el rompimiento de los compuestos orgánicos generando estructuras más sencillas y residuos. De esta forma, las reacciones bioquímicas llevadas a cabo emplean el Oxígeno disuelto en el agua, limitando la disponibilidad de éste en la corriente.

- **Compuestos orgánicos persistentes:**

Estos compuestos no se descomponen a través de la acción biológica, por lo que pueden permanecer indefinidamente. Ya que la naturaleza no puede eliminarlos por sí misma, éstos se acumulan alcanzando concentraciones peligrosas para el medio acuático y teniendo un gran impacto en la salud.

- **Nutrientes:**

Los microorganismos requieren condiciones favorables para su crecimiento y reproducción. Estos elementos incluyen carbón, Oxígeno, hidrógeno, nitrógeno, fósforo, azufre entre otros, presentes en cantidades trazas. Cuando alguno de ellos no existe, el crecimiento y reproducción se afectan.

- **Materia suspendida**

La materia suspendida tiene un tamaño de partícula mayor que las moléculas disueltas y los iones, dividiéndose en partículas suspendidas y coloidales.

- **Temperatura**

La temperatura es el principal ejemplo de la complejidad del agua ya, que su efecto puede ser dañino o benéfico dependiendo de las circunstancias. Con el aumento de la temperatura el valor de la DBO₅ aumenta y el Oxígeno disuelto disminuye y por tanto es menos eficiente la reaeración. Otro factor importante por el aumento de la temperatura es aceleración en la muerte de algunas especies.

2.4.2. Principales Enfermedades Relacionadas con el Agua

Modelo Epidemiológico de riesgos para la salud (OMS, 2020)

Explica la relación que existe entre la salud y el uso de excretas y aguas residuales en la agricultura y la acuicultura, mismo que estipula que el excesivo número o grado de infecciones y enfermedades originadas por varias clases o patógenos:

- Infecciones intestinales: nemátodos, tipos de helmintos, como Ascaris, Trichuris y Uncinaria.
- Infecciones virales excretadas (que incluyen diarreas ocasionadas por rotavirus y la hepatitis A)
- Infecciones provocadas por tremátodos y cestodos. Particularmente esquistomiasis.

El agua contaminada y el saneamiento deficiente están relacionados con la transmisión de enfermedades como el cólera, otras diarreas, la disentería, la hepatitis A, la fiebre tifoidea y la poliomielitis.

2.5 Agua Residual

Las aguas residuales son fundamentalmente las aguas de abastecimiento de una población, después de haber sido impurificadas por diversos usos. Desde el punto de vista de su origen, resulta la combinación de los líquidos o desechos arrastrados por el agua, procedentes de las casas habitación, edificios comercios e instituciones, junto a las provenientes de los establecimientos industriales y las aguas subterráneas, superficiales o de precipitación que puedan agregarse (Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, 1976).

El tratamiento de las aguas residuales es relativamente reciente. Su inicio data de fines de 1800 y principios del actual siglo y coincide con la época de la higiene, tal como se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Desarrollo histórico en el tratamiento de aguas residuales (Rojas, 2002).

Fecha	Desarrollo
A.C.	Irrigación con aguas residuales – Atenas
1550	Uso de aguas residuales en agricultura – Alemania
1700	Uso de aguas residuales en agricultura – Reino Unido
1762	Precipitación química de aguas residuales – Reino Unido
1860	Dispositivo de Mouras. Tratamiento anaerobio de sólidos de aguas residuales
1865	Experimentos sobre Microbiología de digestión de lodos – Reino Unido
1868	Investigaciones sobre filtración intermitente de aguas residuales – Reino Unido
1870	Filtración en arena de aguas residuales – Reino Unido
1876	Primeras fosas sépticas – USA
1882	Experimentos sobre Aireación de alcantarillas – Reino Unido
1884	Introducción de las rejillas de desbaste – USA
1887	Estación experimental de Lawrence para el estudio de agua y aguas residuales. Massachussets –USA
1887	Primera planta de precipitación química – USA
1889	Filtración de lechos de contacto - Massachussets, USA
1891	Digestión de lodos – Alemania
1895	Recolección de metano de fosas sépticas y su empleo en alumbrado reino Unido
1898	Molinete hidráulico para filtros percoladores – Reino Unido

Continuación.....Cuadro 1.

1904	Empleo de desarenadores – USA
1904	Fosa séptica Travis de dos pisos – Reino Unido
1904	Tanque Imhoff – Alemania
1906	Cloración de aguas residuales – USA
1908	Ley de Chick – USA
1911	Aplicación de tanques Imhoff – USA
1911	Digestión separada de lodos – USA
1914	Tratamiento de aguas residuales por lodos activados – Reino Unido
1916	Primera planta municipal de lodos activados USA
1925	Aeración por contacto – USA

2.5.1. Origen de las Aguas Residuales y los Desechos

Los desechos pueden ser según Rojas (2002):

- Desechos humanos y animales
- Desperdicios caseros
- Corrientes pluviales
- Infiltración de aguas subterráneas
- Desechos industriales

2.5.2. Aspectos de las Aguas Residuales

Las aguas residuales son líquidos turbios que contienen material sólido en suspensión cuando son frescas, su color es gris y tienen un olor a moho no desagradable. Flotan en ellas cantidades variables de materia: sustancias fecales, trozos de alimentos, basura, papel, astillas y otros residuos de las actividades cotidianas de los habitantes de una comunidad. Con el transcurso del tiempo, el color cambia gradualmente de gris a negro, desarrollándose un olor ofensivo y desagradable (Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, 1976).

En el Cuadro 2 se pueden apreciar las características del agua residual y sus fuentes de origen mencionadas lo que nos proporciona una visión más amplia de cómo se pueden conformar.

Cuadro 2. Características de las aguas residuales y fuentes de origen (Rojas, 2002).

Características Físicas Sólidos Temperatura Color Olor	Suministro de agua, residuos industriales y domésticos Residuos industriales y domésticos Residuos industriales y domésticos Descomposición de residuos líquidos
Características Químicas Orgánicas Proteínas Carbohidratos Aceites y grasas Tensioactivos Fenoles Pesticidas	Residuos industriales y domésticos Residuos industriales y domésticos Residuos comerciales, industriales y domésticos Residuos industriales y domésticos Residuos industriales Residuos agrícolas
Inorgánicas pH Cloruros Nitrógeno Fósforo Azufre Tóxicos Metales Pesados Gases Oxígeno Hidrógeno sulfurado Metano	Residuos industriales Suministro de agua, residuos industriales e infiltraciones Residuos agrícolas y domésticos Residuos agrícolas, industriales y domésticos Suministro de agua y residuos industriales Residuos industriales Residuos industriales Suministro de agua e infiltraciones Residuos domésticos Residuos domésticos
Características Biológicas Virus Bacterias Protozoarios Nematodos	Residuos domésticos Residuos domésticos Residuos domésticos Residuos domésticos

2.5.3. Volúmenes de Aguas Residual en México

En la Figura 4 se observa que, durante el año 2017, las 2526 plantas en operación a lo largo del país trataron $135.6 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$, es decir el 63 por ciento de los $215.2 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$ recolectados a través de los sistemas de alcantarillado (CONAGUA, 2018).

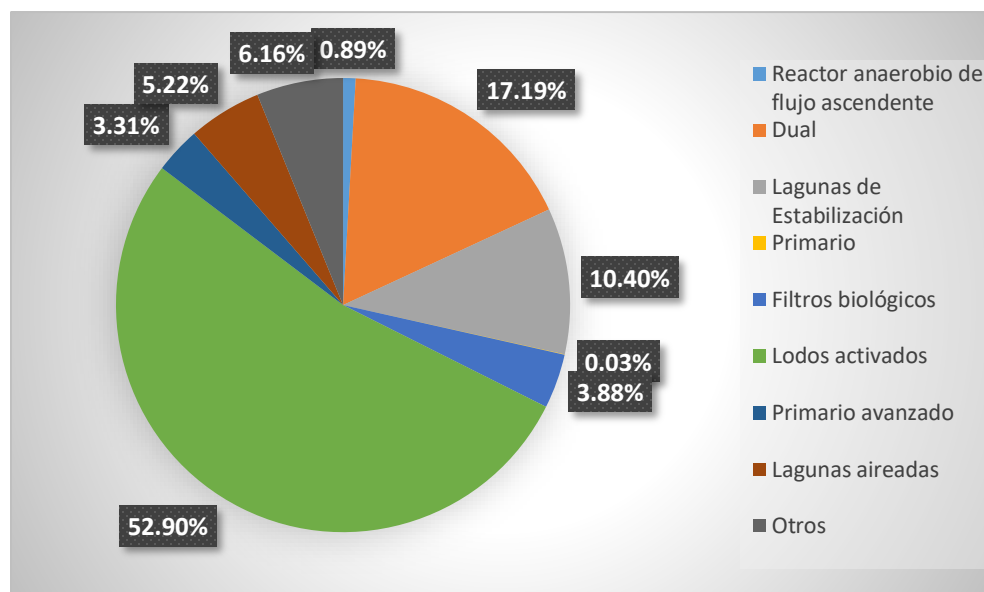


Figura 4. Principales procesos de tratamiento (CONAGUA, 2018).

Por razones de interés se muestra un resumen de datos por Entidad Federativa de algunos estados de la República Mexicana y como principal interés los datos del estado de Coahuila de Zaragoza que es donde se encuentra la PTAR (Cuadro 3).

Cuadro 3. Datos geográficos y socioeconómicos por Entidad Federativa (CONAGUA 2018).

Entidad Federativa	Superficie continental (km ²)	Agua renovable 2017 (hm ³ /año)	Población a mediados de año 2017 (millones de hab.)	Agua renovable per cápita 2017 (m ³ /hab/año.)	Municipios o alcaldías de la CDMX (número)
Aguascalientes	5618	536	1.32	394	11
Baja california	71446	3045	3.58	843	5
Baja california Sur	73922	1235	0.81	1579	5
Campeche	57924	5815	0.94	15474	11
Coahuila de Zaragoza	151563	3457	3.03	1053	38
Colima	5625	2159	0.75	2887	10
Chiapas	73289	113557	5.38	21199	120
Chihuahua	247455	11759	3.78	3180	67
Ciudad de México	1486	644	8.81	55	16
Durango	123451	12594	1.8	7508	39

En el Cuadro 4 se muestra información¹ de algunos Estados de la República Mexicana y como interés principal tenemos los datos para el estado de Coahuila de Zaragoza donde se encuentra la PTAR.

Cuadro 4. Estados de la República Mexicana, así como el número de PTAR con su capacidad instalada y tratada (CONAGUA, 2018).

Entidad Federativa	Número de plantas en operación	Capacidad instalada (m ³ .seg ⁻¹)	Caudal tratado (m ³ .seg ⁻¹)
Aguascalientes	69	0.34	0.17
Baja California	118	13.05	13.03
Baja California Sur	29	4.97	4.96
Campeche	191	4.06	4.06
Coahuila de Zaragoza	64	0.81	0.55
Colima	15	0.46	0.29
Chiapas	121	1.98	1.65
Chihuahua	15	0.65	0.28
Ciudad de México	8	0.01	0.01
Durango	46	1.13	0.66

2.6 Tratamiento de Aguas Residuales

Según Oropeza (2006) el tratamiento de aguas residuales, tanto municipales como industriales, tiene como objetivo remover los contaminantes presentes con el fin de hacerlas aptas para otros reúsos o bien para evitar daños al ambiente. Los contaminantes contenidos en las aguas residuales pasan a las plantas de tratamiento donde se eliminan en gran medida por la absorción de lodo producto de un tratamiento fisicoquímico o biológico.

Por tratamiento de las aguas residuales se entiende aquellos procesos donde se ven involucrados fenómenos físicos, químicos y biológicos para la remoción y degradación de contaminantes. El objetivo de estos métodos es disminuir la carga de contaminantes, así como el impacto que producen en el ambiente. Sin embargo, algunos procesos sofisticados ayudan a que el agua que

está siendo tratada, pueda reutilizarse en actividades que requieren una mayor calidad de los efluentes (Pérez y Camacho, 2011).

En el Cuadro 5 se muestran las operaciones, procesos y sistemas de tratamiento para remover los principales contaminantes del agua residual municipal.

Cuadro 5. Procesos de Tratamiento del Agua Residual (Noyola, 2000).

CONTAMINANTES	UNIDAD, PROCESO O SIST. DE TRATAM.	CLASIFICACION
Sólidos Suspendidos (SS)	Cribado y desmenuzado	F
	Sedimentación	F
	Flotación	F
	Filtración	F
	Coagulación/sedimentación	Q/F
Orgánicos Biodegradables	Lodos activados	B
	Filtro percolador	B
	Discos biológicos	B
	Rotatorios	
	Lagunas aeradas	B
	Lagunas de oxidación	F/B
	Filtración de arena	B/Q/F
Físico/químico	F/Q	
Patógenos	Cloración	Q
	Ozonación	Q
Nutrientes: Nitrógeno	Nitrificación y desnitrificación con biomasa suspendida	B
	Nitrificación y desnitrificación con biomasa fija	B
	Arrastre con amoníaco	Q/F
	Intercambió iónico	Q
	Cloración en el punto de quiebre	Q
Fosforo	Coagulación/sedimentación con sales metálicas	Q/F
	Coagulación/sedimentación con cal	Q/F
	Remoción bioquímica	B/Q
Orgánicos Refractarios	Adsorción con carbón activado	F
	Ozonación	
Metales Pesados	Precipitación química	Q
	Intercambio iónico	Q
Sólidos Inorgánicos Disueltos	Intercambio iónico	Q
	Ósmosis inversa	F
	Electrodialisis	Q

Q= químicos, F= físicos y B= biológicos.

2.6.1. Fases del Tratamiento de Aguas Residuales

Existen cuatro fases de tratamientos que se clasifican de acuerdo al tipo de contaminante que será removido.

2.6.2. Tratamiento Preliminar

Rojas (2002) describe que este tratamiento está destinado a la preparación o acondicionamiento de las aguas residuales con el objetivo de proteger las instalaciones, el funcionamiento de las obras de tratamiento y eliminar o reducir sensiblemente las condiciones indeseables relacionadas principalmente con la apariencia estética de las plantas de tratamiento.

2.6.3. Tratamiento Primario

Esta etapa tiene como objetivo eliminar, por efecto de la gravedad, los sólidos suspendidos de las aguas residuales; se logra bien de manera libre o aislada con químicos que aglomeran partículas (floculantes) para que ganen peso y decanten con mayor facilidad (Lozano, 2012).

Se refiere comúnmente a la remoción parcial de sólidos suspendidos, materia orgánica, u otros patógenos, mediante sedimentación u otros medios y da pauta para preparar el agua para el tratamiento secundario. El tratamiento primario remueve alrededor del 60 por ciento de los sólidos suspendidos del agua residual cruda y un 35 por ciento de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) (Vega, 2012).

Las operaciones unitarias más frecuentemente empleadas para el tratamiento primario de las aguas residuales urbanas son: decantadores, tamices y unidades de decantación asistida químicamente (Lozano 2012).

2.6.4. Tratamiento Secundario o Biológico

El mismo autor describe como depuración o tratamiento biológico de las aguas residuales, es entendido como la eliminación de contaminantes mediante

la actividad biológica de los microorganismos presentes en los reactores. La materia orgánica (MO) en suspensión es disuelta y convertida, mediante procesos de oxidación química, en biomasa y sólidos inorgánicos sedimentables y este tratamiento es capaz de remover DBO_5 y SST en valores cercanos al 85 por ciento.

2.6.5. Tratamiento Avanzado o Terciario

Rojas (2002) menciona que este tratamiento tiene como objetivo complementar los procesos mencionados anteriormente para lograr efluentes más puros, con menor carga contaminante y que pueda ser utilizado para diferentes usos como recarga de acuíferos, recreación, agua industrial, uso agrícola, etc. Las sustancias o compuestos comúnmente removidos son:

- Fosfatos y nitratos
- Huevos y quistes de parásitos
- Sustancias tenso activas
- Algas
- Bacterias y virus (desinfección)
- Radionúclidos.
- Sólidos totales y disueltos
- Temperatura

2.6.6. Desinfección

Se emplea para reducir principalmente el contenido de bacterias, virus y quistes amebianos en las aguas residuales tratadas, previo a sus disposiciones finales. La desinfección consiste en la destrucción selectiva de los organismos causantes de las enfermedades. La desinfección suele ser realizada mediante agentes químicos, físicos, mecánicos y radiación. El más utilizado es la desinfección química con cloro (Rojas, 2002).

En el Cuadro 6 se pueden observar los diferentes tratamientos que se pueden realizar en una PTAR para obtener un agua de acuerdo a la calidad deseada.

Cuadro 6. Tipos de pretratamientos y tratamientos de aguas residuales (Rojas,2002).

Tratamiento Preliminar	Tratamiento Primario		Tratamiento Secundario		Tratamiento Terciario
	Químico	Físico	Remoción de materia orgánica y coloidal	Remoción de sólidos suspendidos	
Desbaste Rejas Rejillas Cedazos	Neutralización	Flotación	Lodos Activados Convencional Alta capacidad Contacto estabilización Aireación prolongada	Sedimentación	Coagulación /Sedimentación
Trituradores	Coagulación/Sedimentación				Filtración
Desarena-do	Cloración	lodo	Filtración biológica Filtros percoladores Alta tasa Baja tasa Fase simple Fase doble Discos rotatorios	lodo	Adsorción Carbón activado
Separación aceite y grasas Homogenización	Adición de nutrientes		Proceso Unox/Linde Laguna estabilizadora Aeróbica Anaeróbica Facultativa Laguna aerada lodo Mezcla completa Aerada facultativa Facultativa con aireación mecánica Difusión de aire Anaeróbica por Contacto Filtro anaeróbico		Intercambio iónico Destilación Ósmosis inversa Electrodialisis Aplicación en suelo Cloración U ozonización Agua

2.6.7. Lodos Activados

Es un proceso biológico de contacto donde los organismos vivos aerobios y los sólidos orgánicos de las aguas residuales se mezclan en un ambiente favorable para la descomposición aeróbica de los sólidos. Como el medio ambiente está formado por las mismas aguas residuales, la eficacia del proceso depende de que se mantenga continuamente Oxígeno disuelto en las aguas residuales durante todo el tratamiento. Las aguas residuales por lo regular no contienen grandes cantidades de microorganismos por lo que es necesario agregar más microorganismos y distribuirlos en ellas. Los lodos activados están formados por flóculos parduscos que consisten, principalmente, en materia orgánica procedente de las aguas residuales, poblados por miradas de bacterias y otras formas de vida biológica (Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, 1976).

2.6.8. Reúso de Aguas Residuales

El crecimiento acelerado de la población y la necesidad de agua, ha demandado desarrollar y utilizar tecnologías más avanzadas para poder tratar y reutilizarlas en actividades domésticas y procesos industriales siempre que cumplan con ciertas características estipuladas de acuerdo al proceso en el cual se reutilizaran, pero fundamentalmente que cumplan con las condiciones que las normativas específicas indiquen (Escalante et al., 2014).

Khurana y Singh (2012) describieron en este aspecto el reúso de aguas residuales en la agricultura se ha convertido en una alternativa rentable, por las grandes aportaciones de N, P, y ciertos metales esenciales para las plantas.

2.6.9. Objetivo Principal del Tratamiento de Agua Residual

Se puede indicar que el objetivo del tratamiento de aguas residuales es la “conversión del agua residual proveniente del uso de las aguas de abastecimiento, en un efluente final aceptable a las condiciones del ambiente (estético, organoléptico y de salud pública) y la disposición adecuada de los

sólidos (lodos) obtenidos durante el proceso de purificación”. Esta definición deja entrever la necesidad de determinar primeramente la característica de los desechos líquidos crudos y, en segundo lugar, preestablecer las características que debe tener el efluente tratado para no afectar el medio ambiente (Rojas, 2002).

2.6.10. Usos Principales del Agua Residual Tratada

Para Magaña (2009) las aguas residuales aportan gran número de elementos nutritivos, es decir es un agua fertilizada esta agua puede ser usada para:

- Riego agrícola
- Riego de parques y jardines públicos
- Riego de calles
- Riego de masas forestales de propiedad pública
- Embalsamiento para prevención de incendios municipales y forestales
- Creación de lagos artificiales

2.6.11. Ventajas de Reutilizar el Agua Residual

Los beneficios obtenidos por ahorros logrados al disminuir problemas de salud pública y de protección al ambiente; por la atenuación del impacto, por cambios de estilo de vida, atenuación de problemas sociales para la obtención del agua, reducción de la explotación de aguas subterráneas y superficiales y de sus consecuencias ambientales, disminución de gastos en la recuperación de suelos salinizados, y en general reducir la tasa de consumo del agua limpia disponible (Möeller et al., 1997).

2.6.12. Desventajas del Agua Residual Tratada

El peligro principal del uso de agua residual recuperada es, a corto plazo, el aumento de exposición de la población a los patógenos. A largo plazo puede

ser la acumulación de determinados elementos o compuestos en plantas y productos de consumo, que puedan afectar al hombre o a los animales. Los actuales tratamientos que se aplican en aguas residuales pueden reducir mucho las concentraciones de organismos patógenos, pero aún es muy difícil asegurar la eliminación completa (Magaña, 2009).

2.7 Normatividad

Los beneficios de contar con agua de calidad son innumerables, por esta razón, en México se ha creado un marco normativo que se encarga de regular las descargas de aguas residuales a los cuerpos receptores a través de las siguientes normas publicadas por el Diario Oficial de la Federación –DOF– en sus diferentes fechas

Norma Oficial Mexicana NOM-001-Semarnat-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas o bienes nacionales (DOF, 1997).

Norma Oficial Mexicana NOM-002-Semarnat-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en la descarga de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal (DOF, 1998).

Norma Oficial Mexicana NOM-003-Semarnat-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios públicos (DOF, 1998).

Norma Oficial Mexicana NOM-004-Semarnat-2001, que establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final (DOF, 2003).

La preocupación por las descargas de las aguas residuales y sus efectos al medio ambiente han dado lugar a la promulgación de leyes como la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente publicada el 28 de enero 1988 y la Ley de Aguas Nacionales publicada el primero de diciembre de 1992, que establecen la necesidad de prevenir y controlar la contaminación del agua y los recursos hídricos (Ducci et al., 2013).

2.8 Clasificación Agronómica para Uso Agrícola

El contenido de clasificación agronómica fue obtenido del curso Suelos Salinos y Sódicos (Bolívar, 2018).

Calidad del agua: Concepto relativo que depende del uso para el cual el agua es destinada

2.8.1. Riego Agrícola:

La calidad es determinante para la producción y la calidad de la cosecha; mantenimiento de la productividad del suelo de una forma sostenible y protección del medio ambiente el Cuadro 7. muestra las consideraciones para riego agrícola.

Cuadro 7. Consideraciones para agua de riego.

Calidad	Química	Aniones	CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}
		Cationes	Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y B
		CE, pH y B	
	Agronómica	Cantidad y Tipo de Sales Solubles Cultivos por irrigar tipo de suelo Condiciones Climáticas Método de Riego Condiciones de Drenaje Manejo integrado	

En el Cuadro 8. Se encuentran los Criterios e Índices de Clasificación Química del Agua de Riego.

Cuadro 8. Criterios para clasificar el agua agronómicamente

CRITERIOS	INDICES	ABREVIATURAS
2. Contenido de sales solubles en el agua.	<ul style="list-style-type: none"> • Conductividad eléctrica • Salinidad efectiva • Salinidad potencial 	CE SE SP RAS
2. Efecto probable del sodio sobre las características físicas del suelo	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Relación de adsorción de sodio ➤ Carbonato de sodio residual 	CSR PSP
3. Contenido de elementos tóxicos para las plantas	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Por ciento de sodio posible ✓ Contenido de boro ✓ Contenido de cloruro 	B Cl

2.8.2. Conductividad Eléctrica (CE)

Es una medida indirecta de la P.O (Presión Osmótica) anteriormente se expresaba en $\mu\text{mhos/cm}$ a $25\text{ }^\circ\text{C}$ ($\text{CE} \times 10^6$) y en la actualidad en $\mu\text{S/cm}$.

2.8.3. Salinidad Efectiva (SE)

Es una estimación del peligro que presentan las sales solubles del agua de riego cuando pasan a formar parte de la solución del suelo

2.8.4. Salinidad Potencial (SP).

Es un índice para estimar el peligro del Cl^- y SO_4^{2-} una vez que se ha perdido el 50 por ciento de la humedad aprovechable y que aumenta considerablemente la P.O de la solución del suelo por lo que uno de los mejores estimadores del efecto de las sales sobre las plantas.

2.8.5. Efecto Probable del Sodio Sobre Características Físicas del Suelo

Cuando las aguas de riego contienen cantidades considerables de sodio en solución, éste se acumula paulatinamente en el suelo y al alcanzar ciertas concentraciones elevadas en relación con los otros cationes disueltos, sea por acumulación de sodio o por precipitación del calcio y magnesio los sustituye en el complejo de intercambio ocasionando un rechazo de los coloides, lo que provoca defloculación en el suelo o pérdida de estructura.

2.8.6. Carbonato de Sodio Residual (CSR)

Cuando en el agua de riego el contenido de Carbonatos y Bicarbonatos es mayor que el de Calcio y Magnesio, existe la posibilidad de que se forme carbonato de sodio, debido a que, por su alta solubilidad, puede permanecer en solución aún después de que han precipitado los Carbonatos de Calcio y Magnesio, pudiendo desplazarlos del complejo de intercambio, produciendo la defloculación del suelo.

2.9 Contenido de los Elementos Tóxicos para las Plantas

- Contenido de Cloro (Cl^-)

El cloruro es especialmente tóxico en árboles frutales como son cítricos y en algunos otros cultivos como la fresa. Éste se expresa en me/l. Sólo se recomienda utilizar este índice cuando se tiene información sobre la tolerancia de los cultivos al Cl.

- Contenido de boro (B)

El boro es un micro elemento indispensable para el buen desarrollo de las plantas. Sin embargo, a muy bajas concentraciones empieza a ser tóxico para la mayoría de los cultivos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Las tomas de muestras para el presente trabajo de investigación se realizaron en la PTAR Hacienda Narro, Figura 5 ubicada en la ciudad de Saltillo, Coah. Las muestras fueron tomadas tanto en el influente como en el efluente. La planta se ubica en las siguientes coordenadas: Latitud 25°21'59.71"N y Longitud 101° 2'0.99" W (Google Earth, 2016).



Figura 5. Localización geográfica PTAR-Hacienda Narro (Google Earth, 2016).

Las muestras fueron tomadas con el equipo de protección requerido. Se llenaron dos botellas de dos litros y medio, una para cada zona la Figura 6 muestra una vista general de la planta. Posteriormente fueron llevadas al Laboratorio de Calidad de Aguas del Departamento de Riego y Drenaje de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro donde se realizaron las siguientes determinaciones.



Figura 6. Vista panorámica de la PTAR-Hacienda Narro.

- Para determinar pH y CE Se utilizó un aparato Orión Versastar (Figura 7).



Figura 7. Conductivimetro Orión Versastar.

- Sólidos Totales (ST).

Se pesó la cápsula, se tomaron 30 ml de muestra de la botella, después se vaciaron los 30 ml en la cápsula para así llevarla a la parrilla eléctrica hasta que quedara un pequeño volumen de muestra la cual se llevó a la estufa a una temperatura de 105° C durante una hora y posteriormente se secó, enfrió para proceder a tomar el peso de la cápsula (Figura 8).



Figura 8. Determinación de Sólidos Totales (ST).

- Sólidos Suspendidos Totales y Volátiles (SST y SSV).

Se utilizó un crisol que estuvo en la estufa y posteriormente pasó a la mufla por 2 horas a 550 °C para pasar al desecador y pesarlo. Se utilizaron 30 ml de muestra los cuales fueron filtrados a través de un filtro de fibra de vidrio, con ayuda de vacío. Después se llevó a la estufa de secado a 105°C por una hora, pasado el tiempo se llevó al desecador para enfriarse y secarse para volver a pesar y poder calcular los SST. Posteriormente se llevó el crisol con el residuo a la mufla y durante 15 minutos a una temperatura de 550 °C. Pasado el tiempo se repitió el proceso del desecador para así sacar, enfriar y pesar. Para poder calcular los SSV y éstos se expresan en $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (Figura 9).



Figura 9. Determinación de Sólidos Suspendidos Totales y Volátiles (SST) y (SSV).

- Sólidos Disueltos Totales (SDT)

Se midió la CE de las dos muestras y se calculó de la siguiente manera: $SDT \text{ en ppm} = 0.64 * CE * 10^6$

- Sólidos Sedimentables (SS)

Se tomó un litro de agua de la muestra y se agregó al cono Imhoff para dejarse por una hora y posteriormente se tomó la lectura la cual se expresa en $ml * l^{-1}$ (Figura 10).



Figura 10. Sólidos Sedimentables en Cono Imhoff (SS).

- Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Se utilizaron 20 ml de la muestra los mismos que fueron vaciados en el matraz Erlenmeyer, se le agregó una pizca de sulfato mercuriano y posteriormente se añadieron 25 ml de dicromato de potasio. De igual manera se agregaron 30 ml de solución de ácido sulfúrico-sulfato y de ahí se pasó al aparato de reflujo y cuando empezó la ebullición se dejó por dos horas, al pasar el tiempo establecido se apagó la parrilla y se agregaron 5 gotas de ortofenantrolina para posteriormente titular con Sulfato de Amonio Ferroso (SAF) pasando de un color verdoso a un marrón rojizo. Se expresa en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (Figura 11).



Figura 11. Determinación de la DQO.

- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)

Se tomaron 5 ml de la muestra y posteriormente se agregaron a una botella wincler (capacidad de botella 330ml) que se llenó casi en su totalidad con agua de dilución que contenía los reactivos y un inóculo y se tomó una primera lectura con el medidor de Oxígeno Disuelto (OD); después se llevaron a incubar a una temperatura de 20° en oscuridad por 5 días y después de ese tiempo se tomó la segunda lectura. El consumo de OD nos da la pauta para calcular la DBO_5 . (Figura 12).



Figura 12. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅).

- Grasas y aceites (G y A)

Se tomaron 20 ml en una probeta, después esta muestra fue filtrada en un matraz Kitasato el cual tenía un papel filtro Wathman número 4, se filtraron 100 ml de suspensión de tierra de diatomea, para luego retirar el papel y colocarlo en un dedal de celulosa. Se llevó a reflujó en un equipo de extracción soxhlet con hexano durante 4 horas para posteriormente pesar el contenido de grasas y aceites que queden en el matraz. Expresándose en $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ (Figura 13).



Figura 13. Determinación de Grasas y Aceites (G Y A).

- Determinación de Coliformes totales y fecales (CT y CF)

Se tomó un ml de la muestra de agua y se llevaron a tubos con NaCL al 0.85 por ciento para realizar diluciones seriadas. Se prepararon los tubos con medio de cultivo caldo lactosado. Los mismos se inocularon con las diluciones anteriores; los tubos que presentaron crecimiento pasaron a la segunda prueba con caldo verde bilis brillante y caldo EC. Se incubaron a 37° por 24- 48 horas y así se determinó el número de tubos positivos para realizar el conteo de Coliformes Totales y Coliformes Fecales, mismos que se expresan en NMP/100 ml (Figura 14).



Figura 14. Determinación de Coliformes Fecales y Totales (CF) y (CT).

- Calidad de Agua

Se determinaron los aniones y cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , CO_3^{2-} , HCO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-}) por el método volumétrico que nos da la concentración de cada uno de los analitos, los que se expresan en Me/l (Figura 15).



Figura 15. Análisis de calidad del agua.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis Físico-Químico-Biológico se muestran en el Cuadro 9. Para el agua perteneciente al influente donde se pueden observar los parámetros determinados así mismo su concentración.

Cuadro 9. Parámetros determinados en el influente.

Parámetros Físico Químicos	Unidad	Resultado influente
DBO ₅	mg*l ⁻¹	658.66
DQO	mg*l ⁻¹	101.245
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg*l ⁻¹	1290
Sólidos Sedimentables (SS)	ml*l ⁻¹	20
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)	mg*l ⁻¹	990
Sólidos Totales (ST)	mg*l ⁻¹	2230
Sólidos Totales Volátiles (STV)	mg*l ⁻¹	1020
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	ppm	1214.72
Grasas y Aceites (Gy A)	mg*l ⁻¹	sin datos
Coliformes Fecales (CF)	NMP/100 ml	>1600
Coliformes Totales (CT)	NMP/100 ml	>1600

En el Cuadro 10. Se pueden observar los resultados de los análisis realizados al efluente.

Cuadro 10. Parámetros determinados en el efluente.

Parámetros Físico Químicos	Unidad	Resultado Efluente
DBO ₅	mg*l ⁻¹	12.67
DQO	mg*l ⁻¹	48.16
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg*l ⁻¹	20
Sólidos Sedimentables (SS)	ml*l ⁻¹	0
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)	mg*l ⁻¹	70
Sólidos Totales (ST)	mg*l ⁻¹	856.67
Sólidos Totales Volátiles (STV)	mg*l ⁻¹	376.67
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	ppm	802.75
Grasas y Aceites (G Y A)	mg*l ⁻¹	3.06
Coliformes Fecales (CF)	NMP/100 ml	70
Coliformes Totales (CT)	NMP/100 ml	540

En el Cuadro 11. Se analizaron los resultados de los parámetros a determinar, realizados al influente y efluente, puede observarse la eficiencia de remoción de cada una de ellas.

Para la DBO₅ puede observarse que de los compuestos biodegradables se elimina el 98 por ciento. Sin embargo, de los químicamente degradables sólo el 53.34 por ciento. Lo que indica que las condiciones del ambiente del reactor son óptimas para los microorganismos.

De los SS y SSV se elimina un porcentaje alto, así como de sólidos disueltos.

De los patógenos (CF) son eliminados en un 95.63 por ciento, lo que indica que el tratamiento es el correcto.

Cuadro 11. Porcentaje de remoción.

Parámetros Físico Químicos	Unidad	Resultado influente	Resultado Efluente	porcentaje de remoción
DBO ₅	mg*l ⁻¹	658.66	12.67	98.08
DQO	mg*l ⁻¹	101.245	48.16	52.43
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg*l ⁻¹	1290	20	98.45
Sólidos Sedimentables (SS)	ml*l ⁻¹	20	0	100.00
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)	mg*l ⁻¹	990	70	92.93
Sólidos Totales (ST)	mg*l ⁻¹	2230	856.67	61.58
Sólidos Totales Volátiles (STV)	mg*l ⁻¹	1020	376.67	63.07
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	ppm	1214.72	802.75	34
Grasas y Aceites (G y A)	mg*l ⁻¹	-----	3.06	-----
Coliformes Fecales (CF)	NMP/100 ml	1600	70	95.63
Coliformes Totales (CT)	NMP/100 ml	1600	540	66.25

En el Cuadro 12. Se realiza la comparación de los datos obtenidos del efluente con las normas NOM-001-SEMARNAT-1996 y la norma NOM-003-SEMARNAT-1997 donde se observa que el agua tratada obtenida cumple con las normas para poder ser reutilizada en el riego.

Cabe mencionar que no todos los parámetros tienen comparación con las normas señaladas (NOM-001-SEMARNAT-1996 y la norma NOM-003-SEMARNAT-1997) anteriormente, porque para dichas normas no aplica (N/A) los parámetros medidos.

Cuadro 12. Comparación de los parámetros del efluente con las Normas Mexicanas.

Parámetros Físico Químicos	Unidad	Resultado Efluente	Límites Máximos Permisibles NOM-001	Límites Máximos Permisibles NOM-003
DBO ₅	mg*l ⁻¹	12.67	150 a 200	20
DQO	mg*l ⁻¹	48.16	N/A	N/A
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg*l ⁻¹	20	150 a 200	20
Sólidos Sedimentables (SS)	ml*l ⁻¹	0	1 a 2	2
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)	mg*l ⁻¹	70	N/A	N/A
Sólidos Totales (ST)	mg*l ⁻¹	856.67	N/A	N/A
Sólidos Totales Volátiles (STV)	mg*l ⁻¹	376.67	N/A	N/A
Sólidos Disueltos Totales (SDT)	ppm	802.75	N/A	N/A
Grasas y Aceites (G y a)	mg*l ⁻¹	3.06	15 a 25	15
Coliformes Fecales (CF)	NMP/100 ml	70	1000	240
Coliformes Totales (CT)	NMP/100 ml	540	N/A	N/A

En la Figura 16 se tiene la relación de la DQO sobre la DBO₅ del influente.

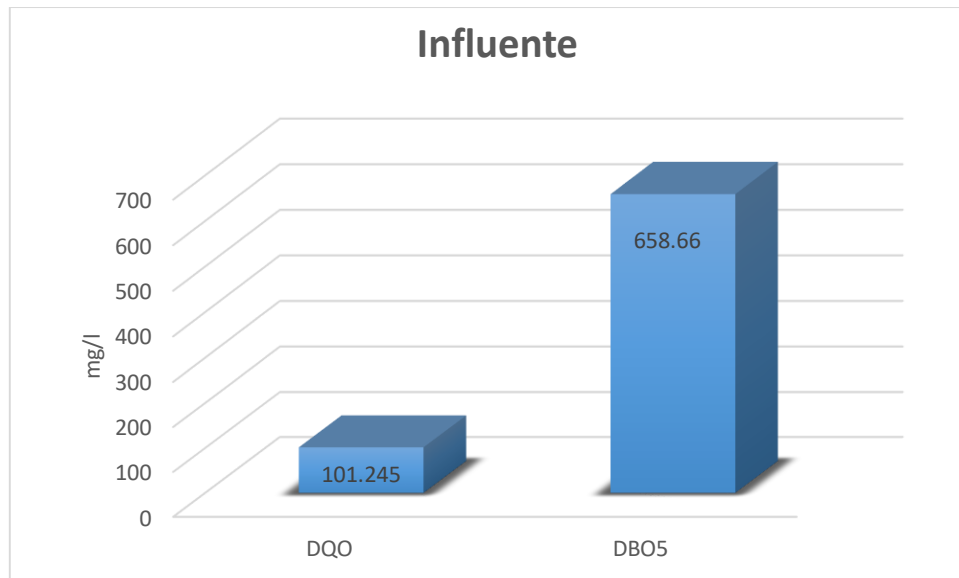


Figura 16. Comparación de DQO y DBO₅ en el Influyente.

En la Figura 17 se tiene el comportamiento después de pasar por el tratamiento de la PTAR donde la Materia Orgánica se degrada biológicamente como se muestra en el Cuadro 12.

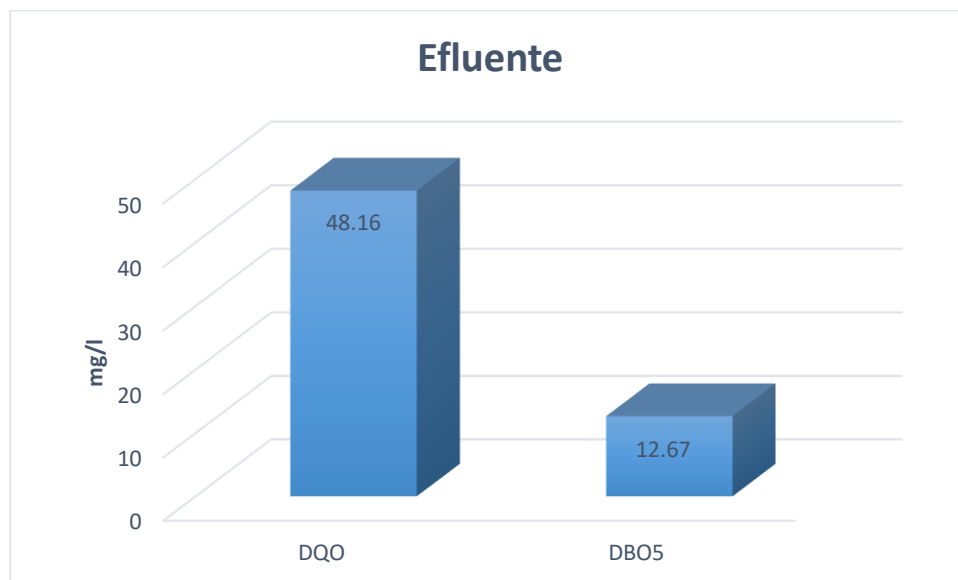


Figura 17. Comparación de DQO y DBO₅ en el efluente.

En Figura 18 se observa que los SST fueron eliminados en un 98.5 por ciento lo que indica que el tratamiento biológico (clarificador secundario) está funcionando adecuadamente.

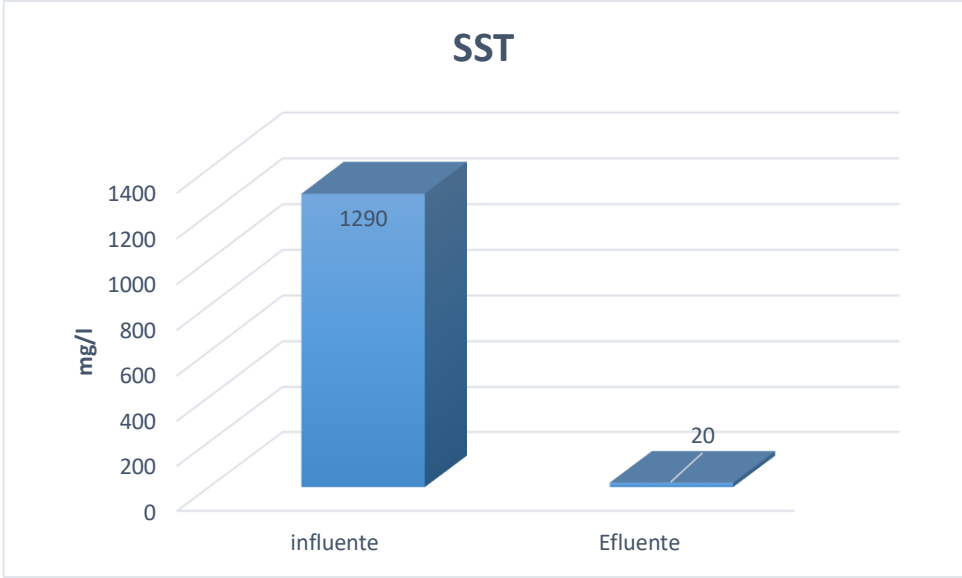


Figura 18. Comparación de Sólidos Suspendidos Totales (SST).

En la Figura 19 se observa que los SSV fueron eliminados en un 92.9 por ciento lo que ayuda a clarificar el agua.

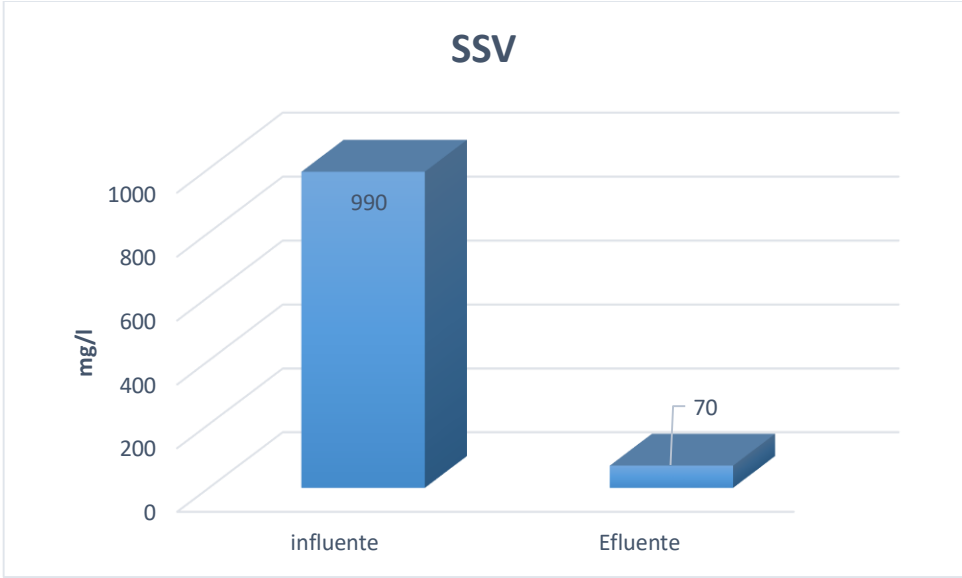


Figura 19. Comparación de Sólidos Sedimentables Volátiles (SSV).

En la Figura 20 se observa que los C.F. fueron eliminados en un 95 por ciento y cumple con las Normas Oficiales Mexicanas.

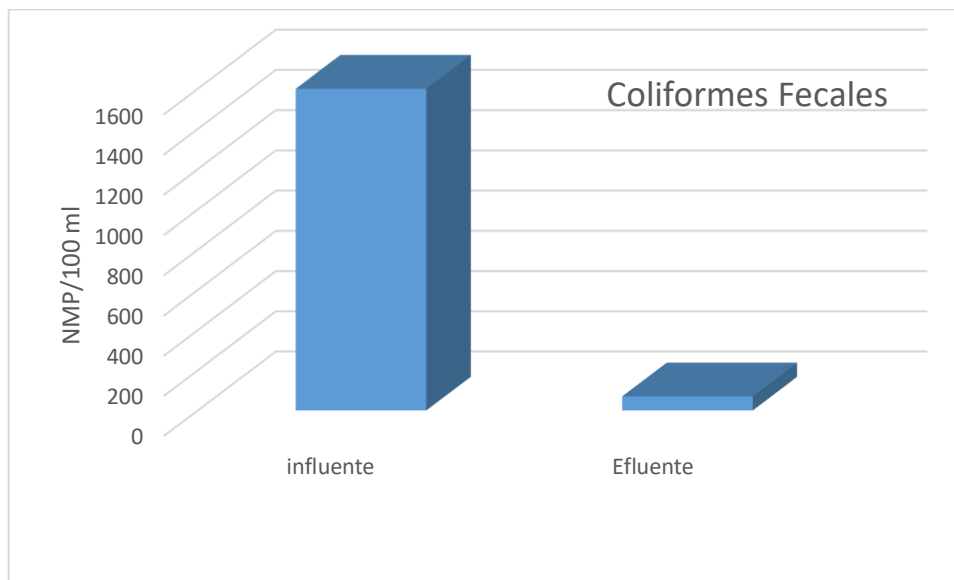


Figura 20. Comparación de Coliformes Fecales (CF).

Calidad Agronómica

Se realiza calidad de aguas a partir de los cationes y aniones presentes para determinar si se puede reutilizar el agua en riego agrícola. En los Cuadros 13 y 14 se encuentran los datos obtenidos, donde se observa el alto contenido de N y P, siendo un gran aporte como fertilizante.

Cuadro 13. Cationes

Cationes	meq*l ⁻¹
Calcio	1.7
Magnesio	12.6
Sodio	-----
Potasio	-----
Boro	-----
Fósforo	3.67 mg* l ⁻¹

Cuadro 14. Aniones

Aniones	meq*l ⁻¹
Carbonatos	1.3
Bicarbonatos	16.0
Cloruros	3.8
Sulfatos	5.1
Nitrógeno	23.667 mg* l ⁻¹

En el Cuadro 15 se reportan los resultados obtenidos a partir de los parámetros agrícolas medidos

El Agua es alta en sales (C3) por lo que se puede utilizar en cultivos tolerantes a la salinidad, siempre y cuando la textura del suelo cuente con un buen drenaje para evitar la acumulación de sal.

La SP y el Cl⁻ nos indican que el método de riego no recomendado, es el de aspersion, porque el Cloro quema el follaje, disminuye el área foliar y por lo tanto, se disminuye relativamente el rendimiento.

Cuadro 15. Calidad de agua para uso Agrícola.

Parámetro	efluente	unidad	Clasificación
CE	1254.3	uS/cm	C3
pH	7.62		ligeramente alcalino
Temperatura	23.8	°C	
P.O	0.451548	bar o atm	
ppm	802.752	ppm	
Me/l	12.543		
SE	12	meq*L ⁻¹	Condicionada
SP	6.37052	meq*L ⁻¹	Condicionada
RAS	-----	meq*L ⁻¹	-----
CSR	3.1	meq*L ⁻¹	no recomendable
PSP	-----	meq*L ⁻¹	-----
cloruros	3.8	meq*L ⁻¹	Condicionada

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El porcentaje de remoción de la DBO₅ es de un 98 por ciento, lo que indica que el tratamiento biológico es el adecuado.
- Dado que el porcentaje de remoción de SST es del 98.4 por ciento esto quiere decir que en el clarificador secundario se está realizando un trabajo adecuado.
- El tratamiento biológico es eficiente ya que elimina el 100 por ciento de los Sólidos Sedimentables lo que evita problemas con el taponamiento de los emisores.
- EL contenido de Coliformes Fecales no es limitante para ser reutilizada en el riego, sólo hay que seleccionar adecuadamente los cultivos.
- Después de haber analizado las muestras obtenidos del efluente de la PTAR, se puede concluir que los valores de los parámetros están por debajo de la norma 003-SEMARNAT-1997 cumpliendo con ella, por lo que el agua puede ser utilizada para el riego.
- Seleccionar adecuadamente el método de riego por el contenido de sales.

6. BIBLIOGRAFIA

- Bolívar, D. M. 2018. “apuntes de suelos salinos y sódicos” Departamento de Riego y Drenaje. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coah., México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2018. Estadísticas del Agua en México. edición 2018, México.
- Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York. 1976. Manual de Tratamiento de Aguas Negras. Editorial Limusa. México D.F.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). Norma Oficial Mexicana NOM – 001 – SEMARNAT – 1996. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. México, D.F.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). Norma Oficial Mexicana NOM – 002 – SEMARNAT – 1996. Límites Máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. México, D.F.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). Norma Oficial Mexicana NOM – 003 – SEMARNAT – 1997. Límites Máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. México, D.F.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). Norma Oficial Mexicana NOM – 004 – SEMARNAT – 1996. Protección ambiental. - lodos y biosólidos.- especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. México, D.F.

- Ducci J., M Peña E., V. Zamora. 2013. Tratamiento de aguas residuales en México. Banco Interamericano de Desarrollo. México. Pag 17.
- Escalante, V., L. Cardoso, E. Ramírez, G. Möeller, J. Montecillos, C. Servín y F. Villavicencio, . (2014). El reuso de agua residual tratada en México. Seminario nacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales. Universidad del Valle. 230-236.
- García, E. 2003 Distribución de la precipitación en la República Mexicana, investigaciones geográficas UNAM pp 67-76.
- Herman E. 1976. manual de tratamiento de aguas negras 5ª ed. México. Editorial limusa México, D.F.
- Khurana S., M., & Singh, P. 2012. Waste water use in crop production: A Review. Resources and Environment. 2, 116-131.
- Lozano W. 2012. Fundamentos de diseño de plantas depuradoras de aguas residuales. Bogotá, Colombia p. 196.
- Magaña, R. 2009 reutilización del agua residual tratada en la cervecería del valle S.A., trabajo de grado presentado para obtener título de administrador de medio ambiente y de los recursos naturales. Universidad autónoma de occidente, Santiago de Cali 144 p.
- Möeller, G. A. Rivas., V. Escalante y F. Pozo. 1997. Tecnología de punta para el reúso de aguas residuales en México. Informe final. Convenio SGP-IMTA, CNA-IMTA.
- Noyola A. 2000. Alternativas del Tratamiento de Aguas Residuales 3ra Ed. México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU) 2018. Sustainable Develop Goal 6: Synthesis Report 2018 on water and saiation. Nueva York, Naciones Unidas.

Oropeza N. 2006 Lodos residuales: estabilización y manejo. Caos Conciencia. México. Pag 61.

Pérez F., y K. Camacho. 2011. Tecnologías para el tratamiento de aguas servidas. Tesina. Universidad Veracruzana. Veracruz, México.

Programa de las Naciones Unidas Para el Medio Ambiente (PNUMA), GEMS 2007. Program Water Quality Outlook. PNUMA Sistema Mundial de Vigilancia del Medio Ambiente, programa de agua, Instituto Nacional de Investigación sobre el Agua. Canadá.

Rojas, R. 2002. Gestión Integral de Tratamiento de Aguas Residuales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. División de Salud y Ambiente.

Rolland, L. y Vega Y. 2010. La gestión del agua en México polis vol, 6. Pag. 188.

Vega, Y. 2012. Eficiencia en plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. Distrito Federal, México. Pag. 118.

WWAP Programa Mundial de evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO. 2019. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. No dejar a nadie atrás. Paris, UNESCO.

Páginas de Internet consultadas:

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. SIAP (2017) Consulta: 02 Septiembre 2020. Disponible en: http://nube.siap.gob.mx/cierre_agricola/

Sistema Mundial de Información de la FAO sobre el Agua en la Agricultura. AQUASTAT (2020) Consulta: 12 Marzo 2020. Disponible en: <http://www.fao.org/aquastat/es/overview/methodology/water-use>

OMS (2020) Organización Mundial de la Salud. 10 Agosto 2020. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water#:~:text=El%20agua%20contaminada%20puede%20transmitir,zonas%20con%20escasez%20de%20agua>