



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA
LICENCIATURA EN BIOLOGÍA**

**“REMOCIÓN DE PARÁMETROS BACTERIOLÓGICOS Y
FISICOQUÍMICOS EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES MIXTA INDUSTRIAL- DOMÉSTICO”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G O

PRESENTA

MISHELLE AMARANI PORTILLA ROMERO

DIRECTOR DE TESIS:

MTRA. ESPERANZA DEL S. ROBLES VALDERRAMA



Los Reyes Iztacala, Edo. De México, 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIA

El siguiente trabajo de tesis está dedicado con todo mi amor y cariño principalmente a mis padres Araceli Romero Hernández y Miguel Portilla Silva, porque ellos siempre estuvieron a mi lado brindándome su amor, esfuerzo e incondicional apoyo, por quienes hoy he logrado culminar mis estudios.

A mis hermanas Jeydy y Ashley, por su compañía, su cariño y apoyo, porque las amo tanto y quiero ser un ejemplo para que ustedes sean libres de elegir su camino.

Al resto de mi familia y a quienes se han convertido en parte de ella, porque me acompañaron y apoyaron durante todo este proceso de desarrollo, brindándome incluso el tiempo necesario para realizarme profesionalmente.

A TODOS USTEDES, “GRACIAS POR TODO SU APOYO Y PERMITIRME SER PARTE
DE SUS VIDAS”

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Calidad del Agua, Conservación y Mejoramiento del Ambiente de la Unidad de Investigación Interdisciplinaria en Ciencias y de la Salud (UIICSE)

A la QFB Esperanza Robles Valderrama, por aceptarme y guiarme en la etapa final de mi carrera y otorgarme la oportunidad de realizar este proyecto.

A mis sinodales M. en C. Elizabeth Ramírez Flores, a la Biol. Blanca Martínez Rodríguez, a la Biol. María de Guadalupe Sáinz Morales y al Dr. Víctor Manuel Rivera Aguilar por sus enseñanzas, ideas y conocimientos compartidos dentro y fuera de las aulas.

Y por supuesto al Biol. Reynaldo Ayala Patiño, por todos aquellos valiosos conocimientos y experiencias que tuvo el gusto de enseñarme, no solo en el laboratorio si no fuera del mismo.

¡MUCHAS GRACIAS!

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

A/M	Razón Alimento Microorganismo
CT	Coliformes Totales
CF	Coliformes Fecales
DBO₅	Demanda Biológica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
IVL	Índice Volumétrico del Lodo
PT	Fósforo Total
NT	Nitrógeno Total
NO₂	Nitritos
NO₃	Nitratos
NH₃	Nitrógeno Amoniacal
PO₄	Ortofosfatos
OD	Oxígeno Disuelto
ST	Sólidos Totales
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SSV	Sólidos Suspendidos Volátiles
NOM	Norma Oficial Mexicana
RP	Remoción Parcial
RT	Remoción Total

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	9
I. INTRODUCCIÓN.....	10
II. MARCO TEÓRICO.....	13
1. Situación del agua residual industrial en México.....	13
2. Microorganismos de las aguas residuales.....	14
Bacterias.....	14
Protozoos	16
Metazoos.....	17
3. Tratamiento de aguas residuales.....	17
3.1 Pretratamiento.....	17
3.2 Tratamiento primario.....	18
3.3 Tratamiento secundario	18
3.4 Tratamiento terciario	19
4. Lodos activados.....	20
4.1 Eliminación de microorganismos patógenos.....	21
4.2 Indicadores de proceso de lodos activados	22
5. Normatividad.....	26
III. JUSTIFICACIÓN	30
IV. OBJETIVOS.....	31
V. MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
A. Zona de estudio.....	32
B. Trabajo de campo.....	34
C. Trabajo de laboratorio	34
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
A. Eficiencias de remoción	37
Coliformes totales (CT) y coliformes fecales (CF).....	38
Sólidos Suspendidos Totales (SST).....	39
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV).....	40

Ortofosfatos	40
Color	41
Sílice	41
B. Nitritos (NO ₂), Nitratos (NO ₃) y Nitrógeno amoniacal (NH ₃)	42
C. Normatividad.....	43
D. <i>Pseudomonas spp.</i>	44
E. Parámetros de operación	45
pH	45
Oxígeno disuelto	45
Relación de C-N-P	46
Conductividad.....	47
Índice Volumétrico de Sedimentación	48
La relación Alimento Microorganismos.....	48
F. Observación simple al microscopio.....	49
Bacterias.....	49
Metazoos	49
Protozoos	51
VII. CONCLUSIONES.....	55
IX. BIBLIOGRAFÍA.....	59
X. ANEXOS	64
Anexo 1. Tabla de valores fisicoquímicos y bacteriológicos obtenidos en los cuatro puntos de muestreo durante el mes de agosto 2018.....	64
Anexo 2. Tabla de valores fisicoquímicos y bacteriológicos obtenidos en los cuatro puntos de muestreo durante el mes de septiembre 2018.	64
Anexo 3. Tabla de valores fisicoquímicos y bacteriológicos obtenidos en los cuatro puntos de muestreo durante el mes de octubre 2018.	65
Anexo 4. Tabla de valores fisicoquímicos y bacteriológicos obtenidos en los cuatro puntos de muestreo durante el mes de noviembre 2018.	65
Anexo 5. Tabla de valores fisicoquímicos y bacteriológicos obtenidos en los cuatro puntos de muestreo durante el mes de diciembre 2018.....	66
Anexo 6. Tabla de valores fisicoquímicos y bacteriológicos obtenidos en los cuatro puntos de muestreo durante el mes de enero 2019.	66

Anexo 7. Tabla de valores fisicoquímicos y bacteriológicos obtenidos en los cuatro puntos de muestreo durante el mes de febrero 2019.....	67
Anexo 8. Tabla de valores fisicoquímicos y bacteriológicos obtenidos en los cuatro puntos de muestreo durante el mes de marzo 2019.	67
Anexo 9. Tabla de valores fisicoquímicos y bacteriológicos obtenidos en los cuatro puntos de muestreo durante el mes de abril 2019.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Volúmenes de descargas de aguas residuales municipales y no municipales tratados.....	14
Figura 2. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales.....	20
Figura 3. Diagrama de proceso del sistema de tratamiento de agua residual.	33
Figura 4. Metodología para identificación de <i>Pseudomonas spp.</i>	36
Figura 5. Resultados de Nitrógeno Amoniacal, Nitritos y Nitratos correspondientes a los diez muestreos.	42
Figura 6. Bacteria filamentososa en los biosólidos. 40x	49
Figura 7. Rotífero presente en los biosólidos. 100x	50
Figura 8. Rotífero presente en los biosólidos. 40x	50
Figura 9. Rotífero presente en los biosólidos. 40x	50
Figura 10. Rotífero presente en los biosólidos. 40x	51
Figura 11. <i>Vorticella spp.</i> presente en los biosólidos. 40x	51
Figura 12. <i>Vorticella spp.</i> presente en los biosólidos. 40x	52
Figura 13. <i>Vorticella spp.</i> presente en los biosólidos. 40x	52
Figura 14. <i>Vorticella spp.</i> presente en los biosólidos. 40x	52
Figura 15. <i>Colpoda spp.</i> presente en los biosólidos. 10x.....	53
Figura 16. <i>Opercularia spp.</i> presente en los biosólidos. 10x	53
Figura 17. <i>Paramecium spp.</i> presente en los biosólidos. 10x.....	53
Figura 18. <i>Oxytrichia spp.</i> presente en los biosólidos. 40x	54
Figura 19. <i>Euplites spp.</i> presente en los biosólidos. 10x	54
Figura 20. <i>Paranema spp.</i> presente en los biosólidos. 40x	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos de acuerdo a la NOM 001.....	27
Tabla 2. Límites máximos permisibles de acuerdo a la NOM 002	28
Tabla 3. Límites máximos permisibles de contaminantes de acuerdo a la NOM 003	29
Tabla 4. Parámetros y técnicas de análisis de laboratorio.	34

Tabla 5a. Porcentajes de remoción parcial y total de los parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos correspondientes a los muestreos de agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre 2018.....	37
Tabla 6. Valores registrados en la muestra del agua de efluente en DBO ₅ , SST, NT, PT y pH comparados con la NOM 001 y NOM 002 correspondientes a los diez muestreos.....	43
Tabla 7. Valores registrados en la muestra del agua de filtro en CF, DBO ₅ y SST comparados con la NOM 003 correspondientes a los diez muestreos.....	44
Tabla 8. Presencia/ausencia de <i>Pseudomonas spp.</i> en las muestras correspondientes a los diez muestreos.	45

RESUMEN

El tratamiento biológico de aguas residuales por el método de lodos activados es un tratamiento muy eficaz. El objetivo de este trabajo fue determinar la eficiencia de remoción de materia orgánica, nutrientes y coliformes totales y fecales en una planta de tratamiento de agua residual de una mezcla de agua residual industrial- doméstico mediante el sistema de lodos activados. Se realizó un total de diez muestreos mensuales desde agosto de 2018 a mayo de 2019, cubriendo un total de catorce parámetros fisicoquímicos y tres bacteriológicos en cada muestreo.

Los resultados muestran eficiencias de remoción de DBO₅ y DQO muy altas, mayores a 96.72% en DBO₅ y 72.53% en DQO. La eficiencia de coliformes totales y fecales fue buena, encontrando valores de 32.43% hasta 72.67%; en el sistema completo la RT alcanzó valores de hasta 100 %, sin embargo en tres muestreos las eficiencias totales se reportaron menores a 26%, lo que indica que el proceso de desinfección del agua tratada no es constante. Por otra parte, se observó en el sistema la correcta oxidación del nitrógeno amoniacal hasta nitratos.

Los resultados de DBO₅ y sólidos suspendidos totales del agua que proviene del proceso de lodos activados están dentro de la NOM 001 y 002 en seis muestreos, mientras los valores de coliformes fecales, DBO₅ y sólidos suspendidos totales del efluente del filtro se registraron dentro de los límites permisibles de la NOM 003 únicamente en el mes de diciembre.

Con los parámetros analizados se busca lograr que esta industria pueda garantizar la eficiencia de remoción de contaminantes y que cumpla con el grado requerido por la legislación para su reúso y descarga.

I. INTRODUCCIÓN

La situación de la disponibilidad del agua no refleja cabalmente la magnitud del problema que enfrentan las sociedades y los ecosistemas naturales. Debido a la descarga continua de aguas residuales domésticas e industriales sin un tratamiento, la calidad de las aguas superficiales y subterráneas se afecta negativamente, poniendo en riesgo la salud de la población y la integridad de los ecosistemas (SEMARNAT, 2012).

Las descargas de aguas residuales no municipales según datos de CONAGUA, han ido en aumento con el paso del tiempo. En 2013, fueron reportadas alrededor de 210.26 m³/s (equivalentes a 6.63 01 kilómetros cúbicos); para el 2015, el volumen fue de aproximadamente a 214.6 m³/s; mientras que para el 2017 el volumen aumentó a 218.1 m³/s. De las cuáles la industria, para el año 2017 trataron 83.7 m³/s de aguas residuales, en 3025 plantas en operación a nivel nacional (CONAGUA, 2014., CONAGUA, 2016, y CONAGUA, 2018).

La escasez de agua y el problema de los grandes volúmenes de aguas residuales generadas por las descargas domésticas y las industriales originaron los sistemas de tratamiento de aguas residuales para disminuir dicha problemática.

Los tratamientos a los que se someten las descargas de aguas residuales deben garantizar la eliminación o recuperación del compuesto orgánico e inorgánico en el grado requerido por la legislación que regula el vertido del efluente, de igual manera debe garantizar las condiciones mínimas del proceso en el caso de reutilización o recirculación de la corriente para uso interno. En el contexto del tratamiento de contaminantes en efluentes acuosos, existen técnicas destructivas y no destructivas, entendiendo esta última como una etapa previa de concentración antes de abordar su destrucción química. La aplicación de un método u otro depende fundamentalmente de la concentración del contaminante y del caudal de efluente (Rodríguez, *et al.*, 2006).

La selección de los procesos o serie de procesos de tratamiento dependen del grado de purificación que se requiera y del grado de concentración de los principales contaminantes, así como la naturaleza de los mismos. Desde el punto de vista de los rendimientos alcanzables en los procesos de depuración, estos se clasifican en

pretratamiento, depuración primaria o física, depuración secundaria o biológica, depuración terciaria y desinfección (Muñoz, 2008).

Según datos de CONAGUA 2018, los principales procesos de tratamiento de aguas residuales son los lodos activados (52.90%) seguidos de procesos duales (17.19%), lagunas de estabilización (10.40%), lagunas aireadas (5.22%), filtros biológicos (3.88%), primario avanzado (3.31%), reactor anaerobio de flujo ascendente (0.89%), primario (0.03%), y otros (6.18%).

El tratamiento biológico de las aguas residuales por los lodos activados ha surgido como un tratamiento muy eficaz para depurar las aguas contaminadas, especialmente para eliminar o reducir la materia orgánica, este método es muy utilizado para el tratamiento de aguas residuales domésticas, y también se adapta para tratar los efluentes industriales en la medida en que estos son biodegradables. Sin embargo, estas aguas contienen o pueden contener otros elementos como bacterias patógenas, metales pesados y compuestos carbonosos difícilmente degradables (Ramírez *et al.*, 2014).

Dentro del proceso de tratamiento por lodos activados existe el sistema por lotes, el cual consiste en un reactor (tanque), donde se realiza la aireación mecánica y la sedimentación. En este el agua residual entra al reactor donde hay un cultivo de microorganismos constituido principalmente por bacterias en suspensión, las cuales en su conjunto se les conoce como "licor mezclado". Las condiciones aerobias y la materia en suspensión se mantienen debido al suministro de aire, que se realiza mediante sistemas de difusión o sistemas mecánicos. Durante este periodo, se inicia un proceso de síntesis y oxidación de la materia orgánica. Aunque, algunas moléculas más complejas, son descompuestas por la acción de enzimas segregadas por las bacterias, antes de ser absorbidas, es posible que exista una porción imposible de ser absorbida y permanezca en el floculo como materia inerte. La suma de lo anterior da como resultado la remoción de materia orgánica, después de un determinado tiempo de retención, el sistema de aireación se detiene y el licor mezclado pasa a una fase de sedimentación en el mismo reactor, donde se separa del agua tratada, esta sale por la parte superior del tanque y los microorganismos y otros productos de la degradación se separan en forma de flóculos, una parte de la biomasa sedimentada se mantiene en el tanque de aeración o reactor para mantener una concentración deseada de sólidos suspendidos volátiles (microorganismos) en el licor mezclado, y la otra parte se retira del sistema como desecho, denominado "lodo residual" o purga (Muñoz, 2008 y CONAGUA, 2016).

Para mejorar la eficiencia de las plantas de tratamiento, es necesario considerar y analizar algunos indicadores sensoriales como el olor, color, la turbiedad e indicadores analíticos que permiten monitorear el funcionamiento del sistema. Los resultados analíticos se usan no solo para conocer las eficiencias del proceso, sino también para resolver problemas de operación mediante el cálculo de parámetros que sirven como base para el funcionamiento adecuado del sistema. algunos indicadores analíticos de mayor importancia en la operación de plantas de lodos activados son: temperatura, pH, oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), nutrientes, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV), grasas y aceites, entre otros (CONAGUA, 2016).

II. MARCO TEÓRICO

1. Situación del agua residual industrial en México

La situación que guarda el consumo de agua, tratamiento y reúso de aguas residuales industriales en México, es poco certera, ya que no se conoce con precisión debido a la precaria disponibilidad de información y a la incapacidad de las instituciones de los tres niveles de gobierno para el monitoreo y supervisión de las industrias que les permita mantener actualizado el Sistema Nacional de Información del Agua.

En México, el uso industrial del agua está considerado en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) y se integra primordialmente por la industria autoabastecida y las termoeléctricas. Los principales rubros de la industria autoabastecida son las industrias química, azucarera, petrolera, de celulosa y de papel, las cuales se abastecen de manera directa de ríos, arroyos, lagos o acuíferos del país. Las termoeléctricas incluyen centrales de vapor, duales, carboeléctricas, de ciclo combinado, de turbo gas y de combustión interna (Web 2).

Hay pocos casos documentados sobre la contaminación industrial. Por ejemplo, en México, las cuencas más contaminadas por la industria se encuentran en los ríos Grijalva y Coatzacoalcos, que reciben descargas de efluentes de la industria azucarera y petroquímica. Siguen a estas cuencas, en grado de contaminación, la del Papaloapan, que recibe efluentes provenientes tanto de las industrias cerveceras y químicas como de destilerías y tenerías, y la del Pánuco, que capta desechos provenientes de la industria del petróleo. Otros problemas de agua se producen por la industria de generación de energía eléctrica (Web 1).

En cuanto al control del estado de la contaminación del agua por la industria, en prácticamente todos los países de América Latina y el Caribe, desde finales de la década de los 80, del siglo XX, se cuenta con una normatividad que pocas veces se aplica por la falta de capacidad para la inspección y el seguimiento de la ley. Esto se debe, en esencia, a la carencia de recursos económicos para llevar a cabo programas de esta naturaleza. Por otra parte, es inexistente el control de la contaminación industrial causada por las industrias denominadas “secas”, que son aquellas que, aunque tienen un escaso o nulo

consumo de agua y por tanto no registran descargas de agua residual, sí vierten a los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, así como al alcantarillado, descargas de desechos sólidos o de líquidos que no son agua (Web 1).

Según datos reportados por CONAGUA 2018, durante el año 2017 la industria trató 83.7 m³/s de aguas residuales, en 3025 plantas en operación a escala nacional.

Centros urbanos (descargas municipales):		
Volumen		
Aguas residuales municipales	7.41	miles de hm ³ /año (234.9 m ³ /s)
Se recolectan en alcantarillado	6.79	miles de hm ³ /año (215.2 m ³ /s)
Se tratan	4.28	miles de hm ³ /año (135.6 m ³ /s)
Carga contaminante		
Se generan	2.00	millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se recolectan en alcantarillado	1.83	millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se remueven en los sistemas de tratamiento	0.92	millones de toneladas de DBO ₅ al año
Usos no municipales, incluyendo a la industria:		
Volumen		
Aguas residuales no municipales	6.88	miles de hm ³ /año (218.1 m ³ /s)
Se tratan	2.64	miles de hm ³ /año (83.7 m ³ /s)
Carga contaminante		
Se generan	10.32	millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se remueven en los sistemas de tratamiento	1.75	millones de toneladas de DBO ₅ al año

Figura 1. Volúmenes de descargas de aguas residuales municipales y no municipales tratados.
Fuente: CONAGUA 2018.

2. Microorganismos de las aguas residuales

Bacterias

Los microorganismos identificados en aguas residuales son muy diversos, encontrando principalmente: Enterovirus, Coliformes totales, Coliformes fecales, Estreptococos fecales, *Escherichia coli*, entre otros (Basulto *et al.*, 2010).

La calidad del agua desde el punto vista microbiológico, se evalúa por medio de bacterias indicadoras. Así, el grupo de bacterias coliformes se aplica como indicador general de monitoreo de calidad del agua. Sin embargo, estos indicadores sólo representan un grupo de microorganismos patógenos limitados a bacterias entéricas; otras bacterias también se han propuesto para ser usados como indicadores complementarios, como *Pseudomonas*

aeruginosa, ya que causa varios tipos de infecciones (García y Iannacone, 2014; Ramirez *et al.*, 2014).

Pseudomonas spp, se incluye dentro del grupo general de microorganismos quimioheterótrofos aeróbicos Gram negativos. Son Bacilos flagelados, su tamaño oscila entre 0,5 - 1 μm de ancho por 1,5 - 4 μm de largo. Debido a que no fermentan la glucosa, se les conoce como no fermentadores, al contrario de las enterobacterias que si lo fermentan. *Pseudomonas* puede multiplicarse en aguas que contengan tan solo cantidades mínimas de nutrientes, y son capaces de utilizar una amplia variedad de fuentes de carbono y nitrógeno para crecer en diversos ambientes (Castillo *et al.*, 2009; Martínez, 2014).

Pseudomonas aeruginosa produce dos pigmentos útiles como son la pioquina, que puede colorear de azul-verdoso y la pioverdina (fluorescencia), pigmento amarillo verdoso que presenta fluorescencia bajo la luz ultravioleta, propiedad que puede usarse en la identificación temprana de dicho microorganismo (Castillo *et al.*, 2009). *P. aeruginosa* pertenece a la familia Pseudomonadaceae y es un bacilo con un flagelo polar. *P. aeruginosa*, al igual que otras *Pseudomonas fluorescentes*, produce catalasa y oxidasa, así como amoniaco a partir de la arginina, y puede utilizar citrato como única fuente de carbono (García y Iannacone, 2014). Estas bacterias también son capaces de sobrevivir y multiplicarse en aguas tratadas, esto debido a una densa capa polisacárida la cual establece una barrera no solo física sino química capaz de proteger a la bacteria de las moléculas e iones de Cloro libre residual (Martínez, 2014).

En general la supervivencia de las bacterias en el agua depende mucho de la presencia de otros microorganismos que tengan relación de predación o competencia, así como una disponibilidad adecuada de nutrientes y condiciones de ambiente favorables, como los son el pH y la temperatura por esta razón, en las aguas residuales el tiempo de promedio de vida de las bacterias es de 20 días, siendo 6 h. el tiempo óptimo para llevar a cabo los análisis para su identificación y cuantificación en este tipo de agua (Martínez, 2014; Sánchez, 2016).

Dado la complejidad de identificar cada una de estas bacterias, se utilizan los indicadores de contaminación, los cuales con su sola presencia indican la presencia de contaminación y que puede haber la existencia de bacterias patógenas. Dentro de los

indicadores bacteriológicos de contaminación se encuentran los coliformes totales (CT) y los coliformes fecales (CF) (Madigan *et al.*, 2009; Robles *et al.*, 2006).

Protozoos

Otro tipo de microorganismos igualmente importantes son los protozoos y rotíferos que actúan como depuradores de los efluentes. Los protozoos consumen las bacterias dispersas que no han flocculado y los rotíferos consumen partículas biológicas que no hallan sedimentado (Martínez, 2014; Sánchez, 2016).

Algunos protozoos son utilizados como indicadores del funcionamiento del proceso, ya que son muy sensibles a los tóxicos y a los cambios de oxígeno (Villaseca, 2001). Es posible diferenciar tres grupos de protozoos según su morfología y movilidad:

- Flagelados: poseen uno o más flagelos que utilizan para el desplazamiento y alimentación. Aparecen principalmente en las fases de inicio de la colonización de los lodos y no son abundantes cuando el proceso de depuración funciona adecuadamente (Villaseca, 2001; Sánchez, 2016).
- Amebas: Se distinguen dos tipos, amebas desnudas, que tienen el cuerpo sin forma definida, y las tecamebas, que presentan una estructura de protección denominada teca que recubre la célula. Se alimentan de materia orgánica disuelta, bacterias y otros protozoos (Mas *et al.*, 2008, Sánchez, 2016).
- Ciliados: Se caracterizan por presentar cilios que utilizan para desplazarse y alimentarse. Pueden clasificarse, según su relación con el floculo, en tres grupos: nadadores, reptantes y sésiles. Los nadadores, corresponden a los ciliados que nadan activamente por el licor mezcla y entre los flóculos; los reptantes también son formas libres, pero se encuentran en las superficies de los flóculos, y los sésiles están unidos a los flóculos mediante el propio cuerpo, por ejemplo, a través de un pedúnculo (Morales, 2014).

Metazoos

Los grupos más comunes son los rotíferos y nematodos, y en menor frecuencia oligoquetos, gastrotricos y los tardígrados. Su presencia es un indicador de lodo en fase madura (Villaseca, 2001).

La relación entre los diferentes microorganismos constituye una red trófica compleja, que va cambiando con el tiempo y en función de las condiciones del sistema. En la fase inicial dominan las bacterias dispersas y los protozoos que entran con el influente, luego aparecen los ciliados nadadores, posteriormente se forman los flóculos disminuyendo el número de bacterias libres y de protozoos flagelados, después se desarrollan los ciliados pedunculados y reptantes y finalmente aparecen los metazoos por encontrarse al tope de la cadena trófica (Villaseca, 2001; Morales, 2014; Sánchez, 2016).

3. Tratamiento de aguas residuales

El sistema de tratamiento de aguas residuales está dividido en cuatro procesos de manera general, pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario (Web 5).

3.1 Pretratamiento

Engloba a aquellos procesos que se sitúan a la entrada de la planta depuradora para eliminar residuos sólidos, arenas y grasas, que de no ser separados dañarían mecánicamente los equipos de las siguientes fases de tratamiento y sedimentarían en las tuberías y conductos de la instalación, obstruyéndolos o bien producirían pérdida de eficacia (grasas en el reactor biológico). En todos los procesos se eliminan los contaminantes del agua residual por medios físicos. Las principales operaciones de pretratamiento son: desbaste, desarenado, desengrasado y homogeneización (Web 5).

3.2 Tratamiento primario

El objetivo principal del tratamiento primario de las aguas residuales es la reducción por completo de los sólidos en suspensión, es decir, los sólidos sedimentables, flotantes y coloidales (Metcalf and Eddy, 2003).

Sólidos sedimentables: son sólidos de mayor densidad por lo que precipitan en el fondo de los sedimentadores primarios por acción de la gravedad. Éstos son evacuados periódicamente, tratados y destinados a convertirse en abono para la agricultura. **Sólidos flotantes:** los sólidos flotantes durante el tratamiento primario de las aguas residuales presentan menor densidad, por lo que flotan de manera natural cuando el agua residual está en reposo. Son eliminados mediante una serie de rasquetas que arrastran las partículas desde la periferia al centro del decantador. **Sólidos coloidales:** son muy estables y no se aprecian a simple vista ya que tienen un tamaño entre 0,001 y 10 micras, son responsables de la turbidez del agua residual. Debido a su estabilidad en el agua residual no es posible eliminarlos mediante decantación, flotación o filtración, en un primer momento, sino que se recurre a la coagulación y floculación.

La coagulación consiste en verter un coagulante en el agua residual para eliminar las cargas eléctricas negativas. A continuación por medio de floculantes las partículas se agrupan. Estos flóculos ya descargados son eliminados según su densidad por medio de decantación o flotación. Una vez realizado el tratamiento primario de las aguas residuales y por tanto, eliminado los sólidos suspendidos, se corrige la alcalinidad o acidez del pH del agua residual añadiendo ácidos o bases al agua residual, ya que un pH demasiado alto o bajo que puede dificultar la acción de los microorganismos del tratamiento biológico o secundario (Metcalf and Edd, 2003; Martínez, 2014; Sánchez, 2016).

3.3 Tratamiento secundario

El tratamiento secundario de depuración constituye una serie de importantes procesos de naturaleza biológica de tratamiento de las aguas residuales que tienen en común la utilización de microorganismos (entre las que destacan las bacterias) para llevar a cabo la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto coloidal como disuelta, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes (N y P). En la mayor parte

de los casos, la materia orgánica constituye la fuente de energía y de carbono que necesitan los microorganismos para su crecimiento. Además, también es necesaria la presencia de nutrientes, que contengan los elementos esenciales para el crecimiento, especialmente los compuestos que contengan N y P, y en el caso del sistema aerobio la presencia de oxígeno disuelto en el agua. Este último aspecto será clave a la hora de elegir el proceso biológico más conveniente, ya que los procesos aerobios utilizan el oxígeno para lograr la eliminación de los contaminantes orgánicos por su transformación en biomasa bacteriana, CO_2 y H_2O , mientras los procesos anaerobios en ausencia de O_2 transforman la sustancia orgánica en biogás, mezcla de metano y CO_2 (Metcalf and Edd, 2003; Martínez, 2014).

Existen diferentes tipos de procesos de tratamiento de las aguas residuales, y según lo reportado por CONAGUA 2018, los principales procesos de tratamiento de aguas residuales son los lodos activados (52.90%) seguidos de los procesos duales (17.19%) y las lagunas de estabilización (10.40%). (Fig. 2). (CONAGUA, 2018).

3.4 Tratamiento terciario

La finalidad de los tratamientos terciarios es eliminar la carga orgánica residual y aquellas otras sustancias contaminantes no eliminadas en los tratamientos secundarios, como por ejemplo, los nutrientes, fósforo y nitrógeno. Estos procesos son de naturaleza biológica o físico química, siendo el proceso unitario más empleado el tratamiento físico-químico, este consta de una coagulación-floculación y una decantación. Otros procesos mpleados como tratamientos terciarios son las resinas de intercambios de iones, la adsorción en carbón activo, la ultrafiltración, la ósmosis inversa, la electrodesinfección, las membranas cerámicas, entre otros (Web 5).

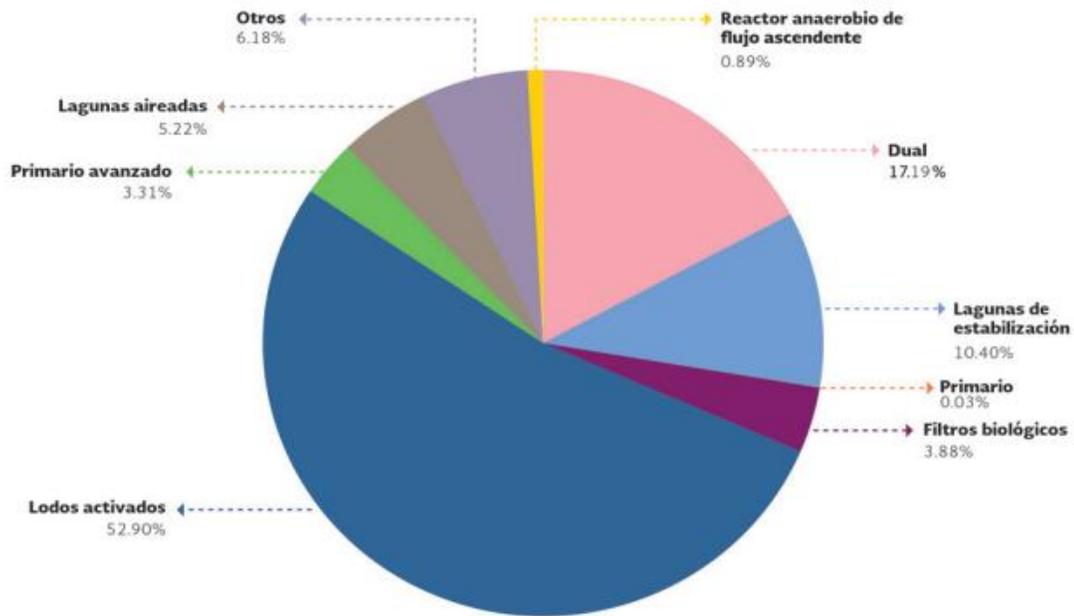


Figura 2. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales. Fuente: Conagua, 2018.

4. Lodos activados

El proceso de lodos activados como tratamiento de aguas residuales, corresponde a un tratamiento secundario. Este fue desarrollado inicialmente en 1914, en Manchester, Inglaterra, por Fowler, Arden, Munford y Lockett. En 1920 este proceso iniciaba su operación en Estados Unidos de América, sin embargo hasta 1940 se dio el uso extensivo de este sistema (CONAGUA, 2016).

El sistema de lodos activados en México se inició en los años cincuenta; las plantas de tratamiento de aguas residuales de esa época eran concebidas para el reúso de las aguas tratadas para riego de áreas verdes, llenado de lagos y enfriamiento en la industria. Así fue como se construyeron las primeras plantas de este tipo en Monterrey, Nuevo León, y en la Cd. de México. El sistema biológico de lodos activados es uno de los tratamientos más utilizados debido a su funcionamiento intensivo y a su alta eficiencia, ya que elimina hasta el 90% del material orgánico. La alta eficiencia del proceso, así como la posibilidad de ampliar las plantas de lodos activados ya sea para la conversión de nutrientes o para remover mayor cantidad de sólidos mediante tratamiento adicional,

hacen de este proceso una excelente alternativa para las descargas que requieren bajas concentraciones de nutrientes o para reuso (CONAGUA, 2016; Ramírez *et al.*, 2015).

Un proceso de lodos activados está constituido por microorganismos o por consorcios bacterianos que forman flóculos, es por esto el nombre de activado, y el de lodo por el aspecto de color café. El floculo está constituido también por materia (coloidal o suspendida) orgánica e inorgánica que ha sido adsorbida y absorbida, ya que éste es poroso (Martínez, 2014; CONAGUA, 2016; Sánchez, 2016).

En el proceso de tratamiento por lodos activados por lotes, el agua residual con una concentración de materia orgánica es vertida a un tanque de aireación, en donde las bacterias metabolizan la materia orgánica mediante el empleo de oxígeno, produciendo nuevas bacterias, generando bióxido de carbono y agua. Lo primero que se da en cualquier sistema biológico es la adsorción, al que se le conoce como proceso de estabilización, así una vez que ha sido cubierta esta capacidad del floculo, es que inicia un proceso de absorción, síntesis y oxidación de la materia orgánica. Sin embargo, una parte de las bacterias mueren y liberan su contenido celular, que es utilizado por otras bacterias. Toda esta mezcla, cuantificada como sólidos suspendidos en el licor mezclado (SSLM), es separada cuando la aireación es detenida para dar lugar a la fase de sedimentación, que se llevará a cabo en el mismo reactor biológico. Una vez que el agua ha sido clarificada, esta sale por la parte superior del tanque y los microorganismos y otros productos de la degradación se separan en forma de flóculos en la parte inferior. Una parte de la biomasa sedimentada se mantiene en el tanque de aeración o reactor para mantener una concentración deseada de sólidos suspendidos volátiles (microorganismos) en el licor mezclado, y la otra parte se retira del sistema como desecho, denominado "lodo residual" o purga. Una de las grandes ventajas de este sistema, radica en la posibilidad de aumentar o disminuir el tiempo de retención de cada proceso según las concentraciones de materia orgánica que se desea degradar (CONAGUA, 2016; Sánchez, 2016).

4.1 Eliminación de microorganismos patógenos

El sistema de lodos activados permite la eliminación considerable de materia orgánica y de sólidos suspendidos, por su parte los microorganismos patógenos no se han llegado a eliminar de forma definitiva mediante un tratamiento secundario, debido a ello es

necesario implementar algún tratamiento terciario que permita eliminar de forma definitiva a estos patógenos, siendo *E. coli* y *Pseudomonas aeruginosa* los principales bioindicadores de contaminación en aguas residuales, estos microorganismos pueden sobrevivir al proceso biológico e inclusive al proceso de cloración y se han encontrado en muchos efluentes de plantas de tratamiento (Martínez *et al.*, 2008).

4.2 Indicadores de proceso de lodos activados

El sistema de lodos activados requiere de un monitoreo continuo, esto con el fin de conocer las posibles causas de un mal funcionamiento de la planta, para determinar los parámetros de operación y conocer las eficiencias del proceso o de cada unidad que lo compone. De acuerdo con lo reportado por CONAGUA (2016), para llevar a efecto un buen monitoreo del proceso se cuenta con diversos tipos de indicadores, tales como los sensoriales, los cuales se pueden obtener rápidamente a través de los sentidos, tales como la vista y el olfato, entre otros; y los analíticos que involucran a parámetros que necesitan alguna medición o determinación de laboratorio.

Los indicadores sensoriales

Los indicadores sensoriales más comunes en sistemas de lodos activados son: color, olor, espumas y natas, algas, rocío en aireadores, turbiedad, burbujas, material flotante, acumulación de sólidos, trayectoria de flujos, turbulencias y mezcla.

- Color. El color puede ser indicativo de un lodo viejo o de uno saludable; un lodo activado aireado en buenas condiciones presenta un color café achocolatado. Un lodo oscuro o negro podrá indicar que no se transfiere el suficiente oxígeno al tanque de aireación y que el lodo es anaerobio.
- Olor. El olor puede indicar si el proceso de tratamiento está trabajando bien. Una planta bien operada no debe generar olores desagradables. Una muestra de lodos activados (licor mezclado) saludable del tanque de aireación tiene un ligero olor a humedad; si el lodo se vuelve séptico, su color cambia a oscuro y el olor irá aumentando hasta ser similar al del huevo podrido (ácido sulfhídrico gaseoso).
- Espuma y natas. La espuma indica que los niveles de sólidos no son adecuados, o bien que el lodo no tiene la edad requerida. El tipo de espuma es indicador de las

condiciones de operación de la planta de tratamiento y que se relaciona directamente con la presencia o ausencia de microorganismos. La formación de espuma blanca en el indica alta concentración de detergentes, aunque en condiciones extremas puede indicar ausencia total de microorganismos en el sistema.

- Turbiedad del agua tratada. Altas concentraciones de sólidos suspendidos en el efluente del sedimentador secundario es una indicación obvia del mal funcionamiento de la planta. Sin embargo, este problema, a menudo es observado solamente hasta que se tienen resultados analíticos del efluente. En la práctica una turbiedad del agua clarificada menor de 5 UNT, indica una excelente operación, de 5 a 10 UNT se considera una buena operación y mayor a 10 UNT una regular operación con indicios de problemas.

Los indicadores analíticos

Los indicadores analíticos son la principal herramienta para monitorear el funcionamiento de una planta de tratamiento. Los resultados analíticos se usan para conocer las eficiencias del proceso, entre los indicadores de mayor importancia en la operación de plantas de lodos activados son: Temperatura, pH, oxígeno disuelto (OD), demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO), nutrientes, sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV).

- Temperatura. La temperatura es un parámetro muy importante de operación debido a que tiene un efecto directo en el nivel de actividad de las bacterias en los sistemas de lodos activados. El rango óptimo de temperatura para la actividad bacteriana aerobia es entre 25 y 32 °C. A altas temperaturas las bacterias se vuelven más activas, inversamente a menor temperatura menor actividad bacteriana. La velocidad de reacción enzimática se duplica cada 10°C (aproximadamente); arriba de 35 °C, las enzimas son destruidas dando como resultado final una baja en la eficiencia del proceso (CONAGUA, 2016; Morales, 2014).
- pH: Para asegurar la actividad y el desarrollo de los microorganismos que son de interés en el proceso de lodos activados es indispensable que el agua residual a

tratar, así como el sistema en el tanque de aireación se mantengan en un pH entre 6.0 y 8.5 unidades, aunque las bacterias pueden sobrevivir en el rango de pH entre 5.0 y 10.0 pero no reproducirse (CONAGUA, 2016; Morales, 2014).

- Oxígeno disuelto. Debido a que el sistema de lodos activados es un proceso aeróbico, una concentración adecuada de OD en el reactor, es vital, para permitir la respiración de los microorganismos. Este parámetro debe hallarse en concentraciones superiores a 2 mg/L O₂, siendo este valor el mínimo necesario para el correcto desarrollo de la biomasa (Metcalf and Eddy, 2003; Morales, 2014).
- La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO) son los parámetros más representativos de la eficiencia de remoción de materia orgánica en un sistema de depuración de aguas, definiéndose como DBO la cantidad de oxígeno necesario que utilizan los microorganismos para llevar a cabo la degradación de la materia orgánica biodegradable y la DQO como la cantidad de un agente químico fuertemente oxidante necesaria para la oxidación de la materia orgánica (Jiménez, 2001). El incremento de la concentración de estos parámetros incide en la disminución del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua con la consecuente afectación a los ecosistemas acuáticos. Por otro lado, el aumento de la DQO indica presencia de sustancias provenientes de descargas no municipales. La DQO es una herramienta que cada vez tiene mayor uso, pues el análisis de laboratorio es mucho más rápido que el de la demanda bioquímica de oxígeno. En aproximadamente 4 a 5 horas se puede realizar y obtener un resultado, mientras que la DBO₅ requiere cinco días. Principalmente por esta razón, la DQO es un importante indicador analítico en plantas de lodos activados, además de ser un índice de descargas industriales (Martínez, 2014; Web 3).
- Nutrientes. Los nutrientes presentes en aguas residuales de tipo doméstico, normalmente están en cantidad suficiente para los microorganismos; sin embargo, habrá aguas residuales de origen industrial, que requieren la adición de nutrientes para su tratamiento por medios biológicos. Cuando no se tiene suficiente nitrógeno se desarrolla una población de microorganismos dispersa o filamentosa que sedimenta pobremente, además, la falta de nitrógeno inhibe la producción de

nuevas células. Al agregar nutrientes al agua cruda, se debe pensar en dejar un remanente o nutrientes residuales en el efluente de la planta. Los niveles de nitrógeno (N) y fósforo (P) deben ser monitoreados en el efluente del clarificador para saber si están presentes y si se cumple con las condiciones de descarga de estos parámetros (CONAGUA, 2016; Morales, 2014).

- Sólidos suspendidos totales y volátiles (SST y SSV). Analíticamente se ha establecido que los SSV son una medida indirecta de la cuantificación de los microorganismos que están presentes en los biosólidos de un sistema de tratamiento de agua residual biológico. Los datos que se requieren de sólidos suspendidos en la planta se obtienen de las diferentes operaciones unitarias para hacer ajustes en cada una de ellas, y evaluar el funcionamiento de la planta continuamente. Las concentraciones de los SST y SSV se emplean para calcular los indicadores de control, tales como la relación alimento-microorganismos (A/M) y el tiempo de retención medio celular (TRMC), el cual a su vez es usado para calcular los niveles requeridos de sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado (SSVLM), y para hacer ajustes periódicos a la recirculación y a la purga de lodos (Martínez, 2014; Web 3).

Los SST tienen su origen en las aguas residuales y erosión del suelo. El incremento de los niveles de SST hace que un cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática. Estos parámetros permiten reconocer gradientes que van desde una condición relativamente natural o sin influencia de la actividad humana; hasta agua que muestra indicios o aportaciones importantes de descargas de aguas residuales municipales y no municipal, así como áreas con deforestación severa (Web 3).

Otros parámetros a considerar

- Relación alimento microorganismos. La relación Alimento Microorganismos (A/M o F/M), hace referencia a la cantidad de materia orgánica alimentada, expresada como DBO₅ o DQO, por unidad de biomasa presente en el reactor, como kg SSV. Valores típicos de la relación A/M se encuentran en el rango de 0,2 - 0,9 kgDBO₅/kgSSV·d, siendo la relación óptima de 0,3 - 0,6kgDBO₅/kgSSV·d

(Morales, 2014). Este parámetro puede ser modificado desde la operación del sistema, ya que, la concentración de microorganismos puede ser rectificadas aumentando o disminuyendo la purga de lodos (Metcalf and Eddy, 2003; Morales, 2014).

- Relación materia orgánica y nutrientes. La deficiencia de nutrientes puede afectar el crecimiento microbiano y modificar los tipos de microorganismos presentes, alterando la velocidad de crecimiento y la cantidad y actividad de los mismos. La relación óptima entre materia orgánica y nutrientes, expresada en unidad de masa como C:N:P, corresponde a 100:5:1 en los sistemas de lodos activados convencionales, es decir, por cada 100 kg de DBO₅ le corresponden 5 kg de N, y 1 kg de P (Diez *et al.*, 2002; Morales, 2014).
- Eficiencia de eliminación. Un sistema de lodos activados, funcionando de manera óptima, alcanza eficiencias de eliminación de un 60% para DQO y de un 95% para DBO₅ (Metcalf and Eddy, 2003; Morales, 2014).
- Conductividad: Los valores normales de conductividad en aguas residuales urbanas oscilan en el rango de 500 a 1.500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Valores elevados de conductividad $>3.000 \mu\text{S}/\text{cm}$, afectan al proceso biológico de depuración, impidiendo el desarrollo de una comunidad bacteriana estable. Se produce un desajuste en la colonia bacteriana, las bacterias filamentosas son más resistentes lo que provoca que se debilite la estructura flocular del fango activo disminuyendo su densidad y por tanto su velocidad de sedimentación (Web 6).

5. Normatividad

El control de las descargas de aguas residuales, es de suma importancia, ya que permite entre otras cosas: controlar la totalidad de los agentes productivos que descargan en un cuerpo específico: inducen una localización de empresas nuevas acorde con la capacidad de los cuerpos receptores para recibir las descargas; otorgan periodos de cumplimiento graduales, que permiten adoptar cambios en proceso en lugar de soluciones remediales

para cumplir con los límites; y contemplan la posibilidad de hacerlas más exigentes si así se requiere, al establecerse un cambio de uso del cuerpo receptor.

Dentro de las normas oficiales mexicanas en vigor se encuentran la NOM-001-ECOL-1996, NOM-002-ECOL-1996 y la NOM-003-ECOL-1997.

NOM-001-ECOL-1996 (06/ENE/97). Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas. Aclaración 30-abril-1997.

Tabla 1. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos de acuerdo a la NOM 001. Fuente: SEMARNAT, NOM-001-ECOL-1996.

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS																					
PAR ÁMETROS	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS				SUELO						
	Uso en riego agrícola (A)		Uso Público Urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		Estuarios (B)		Uso en riego agrícola (A)		Humedales naturales (B)		
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	
Temperatura °C (1)	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40
Grasas y Aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	
Materia Flotante (3)	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	ausente	
Sólidos Sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2	
Sólidos Suspendedos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	N.A.	N.A.	75	125	
Demanda Bioquímica de Oxígeno ₅	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A.	N.A.	75	150	
Nitrógeno Total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	
Fósforo Total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	

(1) Instantáneo
 (2) Muestra Simple Promedio Ponderado
 (3) Ausente según el Método de Prueba definido en la NMX-AA-006. P.D.= Promedio Diario; P.M.= Promedio Mensual; N.A.= No es aplicable (A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

El rango permisible del potencial hidrógeno (pH) es de 5 a 10 unidades. Para determinar la contaminación por patógenos se toma como indicador a los coliformes fecales y el límite máximo permisible para las descargas de aguas residuales vertidas a aguas y bienes nacionales, así como las descargas vertidas a suelo (uso en riego agrícola) es de

1,000 y 2,000 como número más probable (NMP) de coliformes fecales por cada 100 ml para el promedio mensual y diario, respectivamente.

NOM-002-ECOL-1996 (03/JUN/98). Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.

Tabla 2. Límites máximos permisibles de acuerdo a la NOM 002. Fuente: SEMARNAT, NOM-002-ECOL-

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES			
PARAMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique otra)	PROMEDIO MENSUAL	PROMEDIO DIARIO	INSTANTÁNEO
Grasas y aceites	50	75	100
Sólidos sedimentables (mililitros por litro)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

1996.

El rango permisible de pH (potencial hidrógeno) en las descargas de aguas residuales es de 10 (diez) y 5.5 (cinco punto cinco) unidades; la temperatura es de 40°C. (cuarenta grados Celsius. Se permitirá descargar con temperaturas mayores, siempre y cuando se demuestre a la autoridad competente por medio de un estudio sustentado, que no dañe al sistema del mismo y la materia flotante debe estar ausente en las descargas de aguas residuales.

Los límites máximos permisibles para los parámetros demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos totales, que debe cumplir el responsable de la descarga a los

sistemas de alcantarillado urbano o municipal, son los establecidos en la tabla 1 de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996

NOM-003-ECOL-1997 (21/SEP/98). Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Tabla 3. Límites máximos permisibles de contaminantes de acuerdo a la NOM 003. Fuente: SEMARNAT, NOM-003-ECOL-1997.

LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES					
TIPO DE REUSO	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes fecales NMP/100 ml	Huevos de helminto (h/l)	Grasas y aceites mg/l	DBO ₅ mg/l	SST mg/l
SERVICIOS AL PUBLICO CON CONTACTO DIRECTO	240	≥ 1	15	20	20
SERVICIOS AL PUBLICO CON CONTACTO INDIRECTO U OCASIONAL	1,000	≤ 5	15	30	30

III. JUSTIFICACIÓN

El tratamiento biológico por lodos activados es uno de los más utilizados debido a su alta eficiencia de remoción, los tratamientos a los que se someten las descargas de aguas residuales dependen de una serie de factores, entre ellos el volumen de agua, grado de contaminación, así como las características microbiológicas y fisicoquímicas del influente que se genere en cada industria; sin embargo, todas deben garantizar la eliminación de contaminantes en el grado requerido por la legislación que regula el vertido del efluente, es por ello que cada industria requiere ser evaluada, para garantizar que la eficiencia de remoción de contaminantes cumpla con el grado requerido para su reúso y descarga.

Por lo anterior, esta investigación se enfocó en conocer la eficiencia de remoción de parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos en una planta de tratamiento de aguas residuales mixta industrial- doméstico.

IV. OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar la eficiencia de remoción de materia orgánica, nutrientes y coliformes totales y fecales en una planta de tratamiento de agua residual de una mezcla de agua residual industrial- sanitaria mediante el sistema de lodos activados.

Objetivos particulares

- Determinar los parámetros bacteriológicos: coliformes totales, coliformes fecales y *Pseudomonas aeruginosa*
- Determinar los parámetros fisicoquímicos: demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, nitratos, nitritos, fósforo total, ortofosfatos, sólidos totales, sólidos suspendidos totales y volátiles, sílice y conductividad.
- Determinar la eficiencia de remoción de los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos.
- Determinar si el efluente del filtro cumple con los límites máximos permisibles de la NOM 003.
- Determinar si el agua que proviene del proceso de lodos activados cumple con los límites de las normas 001 y 002.
- Determinar la relación F/M (alimento/microorganismos), IVLS (Índice volumétrico de lodos sedimentables), la relación entre DQO y DBO₅, el balance de nutrientes C-N-P (Carbono, Nitrógeno, Fósforo), así como los microorganismos comunes que pueden identificarse a través de una observación simple al microscópico.

V. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron un total de diez muestreos durante el periodo agosto-mayo en una planta de tratamiento biológico ubicada en una empresa de Naucalpan de giro bienestar a la salud en el Edo. de México. Esta industria fabrica pastas dentales, jarabes y pastillas para la tos y antiácidos. El agua residual que se trata en la planta de tratamiento, es una mezcla de residuos sanitarios, de comedor y de procesos de fabricación.

A. Zona de estudio

La planta de tratamiento de aguas residuales de la industria seleccionada cuenta con un tratamiento previo al biológico (sistema de lodos activados) para la eliminación de sólidos producidos en la fabricación de pastas dentales (tratamiento fisicoquímico), esto se debe a que los sólidos pueden alterar la eficiencia del sistema biológico secundario donde se realiza la degradación biológica. Posterior al pretratamiento, el agua se mezcla en una fosa de acopio donde llegan los desechos del comedor, sanitarios, servicios y planta 1, esto con el fin de estabilizar algunos parámetros como la temperatura o pH. Seguido a ello, el agua residual acumulada en la fosa de acopio y en la fosa de igualación es transferida a un reactor biológico donde se realiza el proceso de degradación de materia orgánica, así como la separación del agua depurada (decantación) y los lodos biológicos, luego el agua tratada pasa a una fosa donde el agua es clorada (fosa de cloración) para que una parte del efluente sea descargada al alcantarillado municipal y la otra pase a una fosa de riego, después ésta pasa por unos filtros de partículas con malla hasta llegar a un tanque de riego donde una parte del agua es destinada al riego de jardines y la otra pasa por un filtro de antracita para la eliminación de sólidos suspendidos y mejoramiento de la calidad de agua para su reúso en los sanitarios.

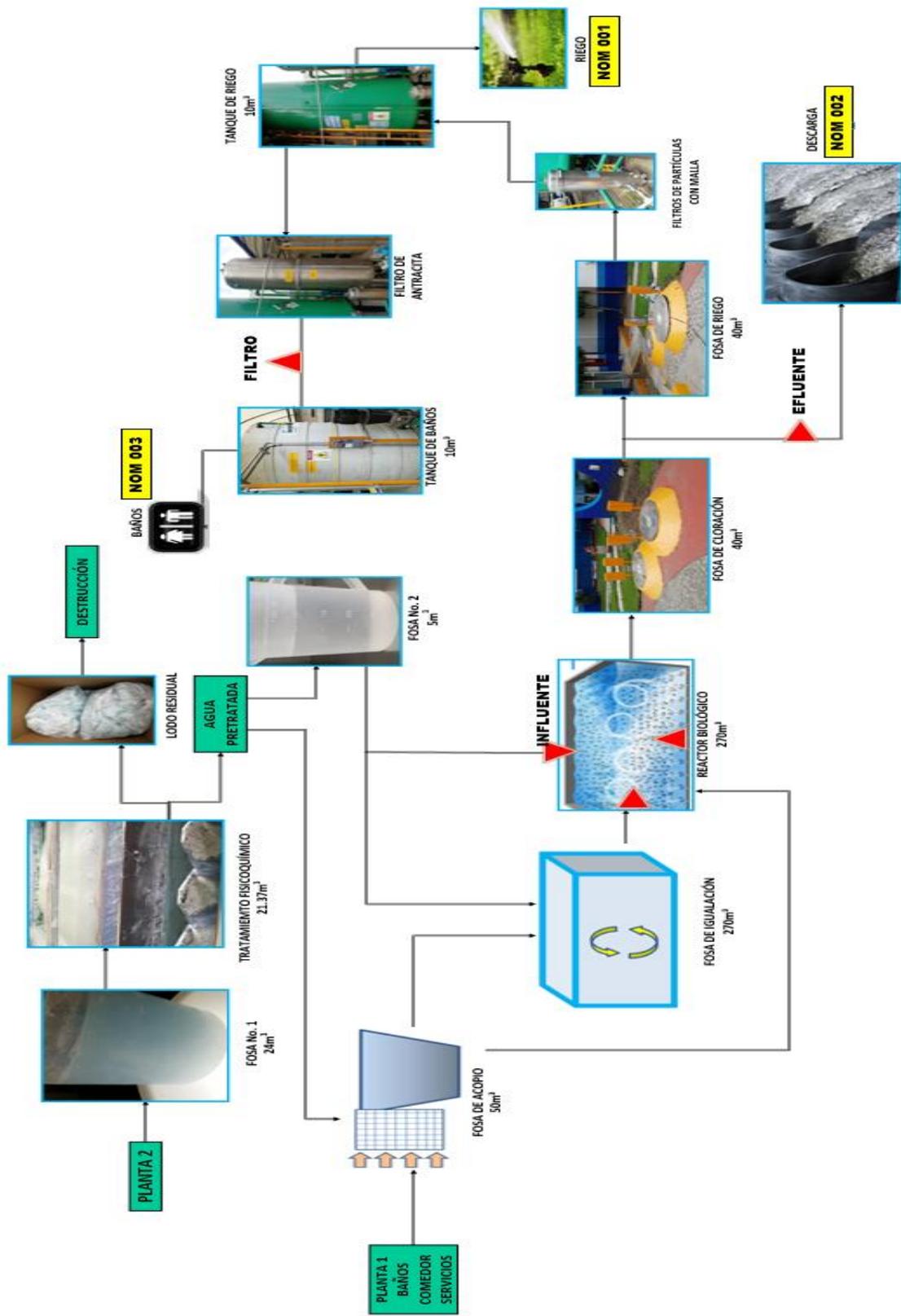


Figura 3. Diagrama de proceso del sistema de tratamiento de agua residual.

B. Trabajo de campo

Se tomaron muestras en el biorreactor, influente, efluente y filtro del sistema, mediante recipientes con capacidad de tres litros para los análisis fisicoquímicos; y con recipientes estériles con capacidad de 500ml para los análisis bacteriológicos, se trasladaron inmediatamente las muestras al laboratorio tratando de mantener una temperatura aproximada de 4 °C para su análisis. En el biorreactor se determinó pH con un potenciómetro Conductronic modelo pH10, oxígeno disuelto, así como temperatura con un equipo Liquiline modelo CM44P y se tomaron muestras con recipientes de 500ml para las observaciones al microscopio.

C. Trabajo de laboratorio

Se determinaron los parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos de acuerdo a las técnicas estandarizadas que se indican en la tabla siguiente (APHA-AWWA-WEF, 1998). En el biorreactor únicamente se determinarán parámetros fisicoquímicos como pH, temperatura, oxígeno disuelto, volumen de sedimentación, peso, sólidos totales, sólidos suspendidos totales y sólidos suspendidos volátiles.

Tabla 4. Parámetros y técnicas de análisis de laboratorio.

Parámetro	Técnica	Equipo
Coliformes totales	NMP	Incubadora/RIOSSA-E51
Coliformes fecales	NMP	Incubadora/RIOSSA-E51 Baño de agua/POLYSCIENCE
<i>Pseudomonas spp</i>	Caldo asparagina y agar cetrimida	Incubadora/RIOSSA-E51
Color verdadero	Colorimetría.	Colorímetro/HANNA-HI96727
Sílíce	Ácido ascórbico	Colorímetro/HACH-DR900

Sólidos suspendidos totales	Gravimetría	Balanza analítica/SCALTEC-SBA32
Sólidos suspendidos volátiles	Gravimetría	Balanza analítica/SCALTEC-SBA32
Nitrógeno amoniacal	Gravimetría	Balanza analítica/SCALTEC-SBA32
Nitratos	Salicilato	Colorímetro/HACH-HI96700C
Nitritos	Reducción con cadmio	Colorímetro/HACH-DR900
DQO	Salicilato	Colorímetro/HACH-DR900
DBO ₅	Reflujo	Colorímetro/HACH-DR1900
Ortofosfatos	Dilución	Incubadora/BARNSTEAD-3550A

Con los resultados se determinó la eficiencia de remoción y se compararon los resultados del filtro con los límites máximos permisibles por la NOM-001-ECOL-1996, NOM-002-ECOL-1996 y la NOM-003-ECOL-1997.

Para la determinación de *Pseudomonas spp*, se analizó el influente, efluente y filtro, siguiendo la siguiente metodología:

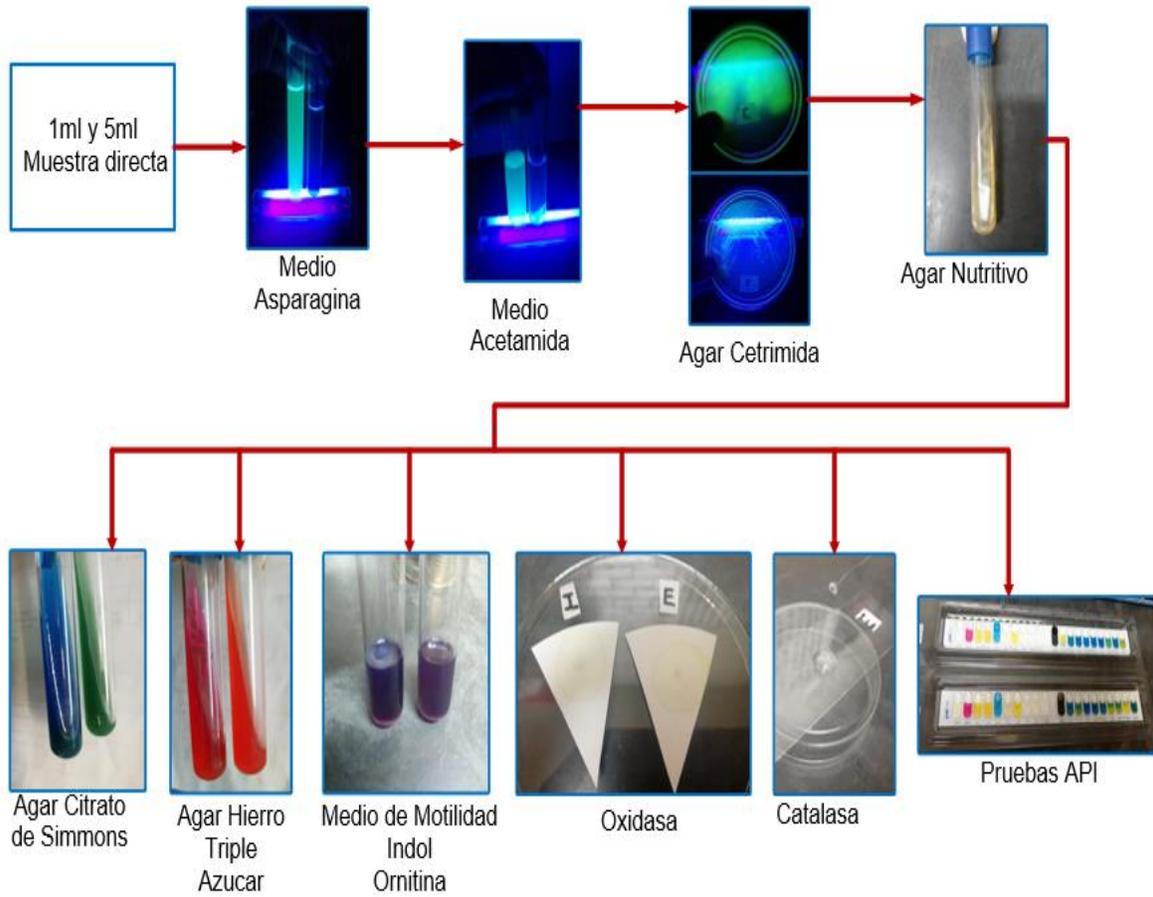


Figura 4. Metodología para identificación de *Pseudomonas* spp.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Eficiencias de remoción

Los valores en porcentaje de eficiencia de remoción de contaminantes bacteriológicos y fisicoquímicos parcial (Influyente-Efluente) correspondientes al agua que se descarga al alcantarillado municipal y la remoción total (Influyente-Filtro) correspondiente al agua para reúso en sanitarios se muestran en la tabla 5a y 5b.

Tabla 5a. Porcentajes de remoción parcial y total de los parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos correspondientes a los muestreos de agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre 2018.

Parámetro	Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre	
	Rem Parcial (I-E)	Rem Total (I-F)								
CT	46.20	86.63	49.11	49.11	32.78	71.93	70.42	42.25	72.67	100.00
CF	33.82	88.64	46.52	49.11	32.78	75.12	70.42	42.25	72.67	100.00
DBO ₅	99.41	99.53	100	100	98.06	97.60	99.53	100	99.52	99.52
DQO	97.42	99.65	90.09	93.48	97.42	99.65	99.61	99.48	97	97
NH ₃	73.33	78.33	98.64	99.61	99.08	98.82	99	99	98.54	99.92
PO ₄	53.27	54.69	0	0	94.54	75.96	0	0	81.98	53.49
SST	79.17	80.56	78.79	85	46	67	77	76.03	93.67	97
SSV	76.92	73.08	82.69	84.62	72	68	82.79	79.51	93.48	96.52
Color verdadero	50.00	75.00	40.00	100	0	100	0.00	25.00	25.00	100
Sílice	48.78	41.46	9.52	74.76	0	0	5.56	11.11	33.33	41.67

Tabla 5b. Porcentajes de remoción parcial y total de los parámetros bacteriológicos y fisicoquímicos correspondientes a los muestreos de enero, febrero, marzo, abril y mayo 2019.

Parámetro	Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo	
	Rem Parcial (I-E)	Rem Total (I-F)								
CT	0	0	63.00	100	32.43	90.38	48.91	13.59	10.66	26.33
CF	0	0	62.96	100	32.43	90.38	48.91	38.04	10.66	26.33
DBO ₅	98.93	99.36	100	99.47	96.72	97.41	98.95	99.04	99.58	99.45
DQO	97.50	99.36	94.95	94	80.36	84.38	83.00	72.53	90.95	89.58
NH ₃	97.41	96	99	98.95	75	99.61	81	83	82	84
PO ₄	40.12	0	100	55.76	0	51.18	0	0	90	75
SST	55	77.17	74	76	88.00	95.17	79.32	76.70	86.86	86.86
SSV	41	75	75.76	73	85.40	95.24	85.22	82.22	87.59	91.03
Color verdadero	0	33	0	100	78.57	96.43	25	25	44	44
Sílice	0	0	16	100	26.92	26.92	100	100	12	12

Coliformes totales (CT) y coliformes fecales (CF)

Los valores elevados de CT y CF normalmente provienen de las aguas negras originadas en sanitarios y letrinas, los coliformes totales como grupo cosmopolita siempre están presentes en aguas residuales (Martínez *et al*, 2008). La planta de tratamiento de este estudio es una mezcla de aguas residuales industriales y sanitarias, por lo cual es normal la presencia de coliformes en la misma.

Según un estudio realizado por Sánchez (2016), las eficiencias de remoción de coliformes esperadas para tratamiento por lodos activados se consideran óptimos con porcentajes que van de un 40% a 50%. Por lo cual, de acuerdo a los porcentajes reportados en la tabla 5a y 5b podemos observar que de manera general el sistema

evaluado es eficiente, con excepción de los meses de enero, mayo y abril, donde las eficiencias totales se reportaron de 0, 13 y 26% respectivamente, lo que indica que el proceso de desinfección del agua tratada no es constante, ya sea por mantenimiento de las instalaciones o por falta de cloro (Reyes, 2016).

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

Para DBO₅ y DQO, tal como podemos observar en la tabla 5a y 5b las eficiencias de remoción fueron muy altas, mayores a 96.72% en DBO₅ y 72.53% en DQO, llegando hasta un 100% de remoción total. Lo cual coincide con lo reportado en un estudio de Sánchez (2016), donde las eficiencias de remoción de DBO₅ en el tratamiento de aguas residuales por el método de lodos activados se registró alrededor del 95%, mientras la DQO alcanzó remociones de alrededor de 90%, por lo cual es muy evidente que todos los muestreos realizados registraron un porcentaje de remoción muy eficiente para éste sistema. Otra razón por la cual se registran altas eficiencias de remoción se debe a que los residuos de esta industria son altamente biodegradables.

Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Los SST en aguas residuales domésticas e industriales presentan una naturaleza mayormente de tipo orgánica, sirviendo como sustrato y fuente nutritiva para muchos microorganismos, su eliminación se convierte en un factor importante para la óptima remoción de bacterias y nutrientes (Molina y Tigreros, 2005).

En la tabla 5a y 5b se aprecian los porcentajes de remoción de SST obtenidos durante los 10 muestreos realizados, situados entre 46% y 93.67% de remoción parcial; mientras la remoción total se sitúa entre un 67% y 97%. Las eficiencias altas en éste parámetro es esperada, ya que una de las tecnologías para la eliminación de sólidos suspendidos a través de sistemas biológicos son los tratamientos secundarios, como los lodos activados (Belmonte *et al.*, 2006; Morales, 2014). Cabe señalar, que estos valores no alcanzaron los límites máximos permisibles para cumplir con la NOM 003, por lo que es necesario implementar un mejor sistema de filtración para remover dichos sólidos.

Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)

En la tabla 5a y tabla 5b, se muestran los porcentajes de remoción de SSV obtenidos, situados entre un 41% y 93.48% de remoción parcial; mientras la remoción total se encuentra entre 68% y 96.52%. Una parte de estos sólidos corresponden a la materia orgánica.

Nitrógeno Amoniacal (NH₃)

En la tabla 5a y 5b, se muestran los porcentajes de remoción de NH₃ obtenidos durante los 10 muestreos realizados, situados entre un 73.33% y 99.08% de remoción parcial; mientras la remoción total se encuentra entre 78.33% y 99.92%. El resultado de la oxidación de la materia orgánica degradando el nitrógeno orgánico a nitrógeno amoniacal y después a nitritos y por último a nitratos es lo que podemos observar al encontrar altas eficiencias de remoción en este parámetro, siendo esto un indicador de un buen tratamiento (Saldarriaga *et al.*, 2011).

Ortofosfatos

De los 10 muestreos realizados, en 4 no hubo remoción y en 2 los valores fueron bajos. En el resto aunque presentaron valores altos de remoción, las concentraciones eran muy bajas ocasionando un error en el cálculo. Cabe mencionar que en general, los porcentajes de remoción del agua que se descarga al municipio (RP) son mayores a los porcentajes de remoción del agua que se destina para reúso en sanitarios (RT), por lo cual es probable que el filtro de antracita por el que pasa el agua tratada, aumente las concentraciones de fósforo en la misma, ya que la antracita es una roca sedimentaria compuesta de carbono (95%) y otros compuestos orgánicos e inorgánicos, dentro de los cuales podemos encontrar fósforo.

Color

Los porcentajes de remoción de color obtenidos durante los 10 muestreos realizados, están situados entre un 0% y 78.57% de remoción parcial; mientras la remoción total se encuentra entre 25% y 100% (tabla 5a y 5b). Claramente se observa que el sistema tiene buenas eficiencias, esto se debe al proceso de cloración (Reyes, 2016) que se realiza, y en gran medida a la dosificación posterior al proceso de filtración, lo que permite alcanzar eficiencias de hasta el 100% como se muestra en el mes de septiembre, octubre, diciembre y febrero.

Sílice

En la tabla 5a y 5b, se muestran los porcentajes de remoción de sílice obtenidos durante los 10 muestreos realizados, con un promedio de 25.21% de remoción parcial; mientras la remoción total fue de 40.79%. Es probable que el sílice disuelto o coloidal se haya removido por el proceso pero en algún momento pudo existir sílice suspendido por los aportes o fugas del sistema fisicoquímico, ya que en la fabricación de pasta se usa alguna forma de sílice como abrasivo. Por otra parte, dichos porcentajes son bajos debido a que hay 2 formas de sílice en el agua: coloidal, la cual no tiene propiedades iónicas, pero tiene un tamaño relativamente grande y se puede eliminar eficazmente mediante métodos mecánicos finos como la ultrafiltración o mediante un método de coagulación tal como en un sistema clarificador; y la iónica que es mucho más pequeña que la coloidal, por lo que las técnicas de remoción mecánica tales como la floculación, la clarificación, la filtración y la flotación no son un proceso efectivo de remoción. Es por ello que para obtener mejor eficiencia en este parámetro, sería necesario implementar algún otro sistema para su eliminación. (Web 8).

B. Nitritos (NO_2), Nitratos (NO_3) y Nitrógeno amoniacal (NH_3)

La nitrificación y desnitrificación son las reacciones que permiten una conversión biológica desde nitrógeno amoniacal a nitratos y posteriormente los nitratos a nitrógeno molecular; estas reacciones son realizadas mediante la acción metabólica de microorganismos (Metcalf and Eddy, 2003). En los valores obtenidos de nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos (figura 5) se observa cómo se va dando el proceso de descomposición de materia orgánica. Por otra parte, como es de esperarse, los valores altos en nitratos indican la correcta degradación de la misma.

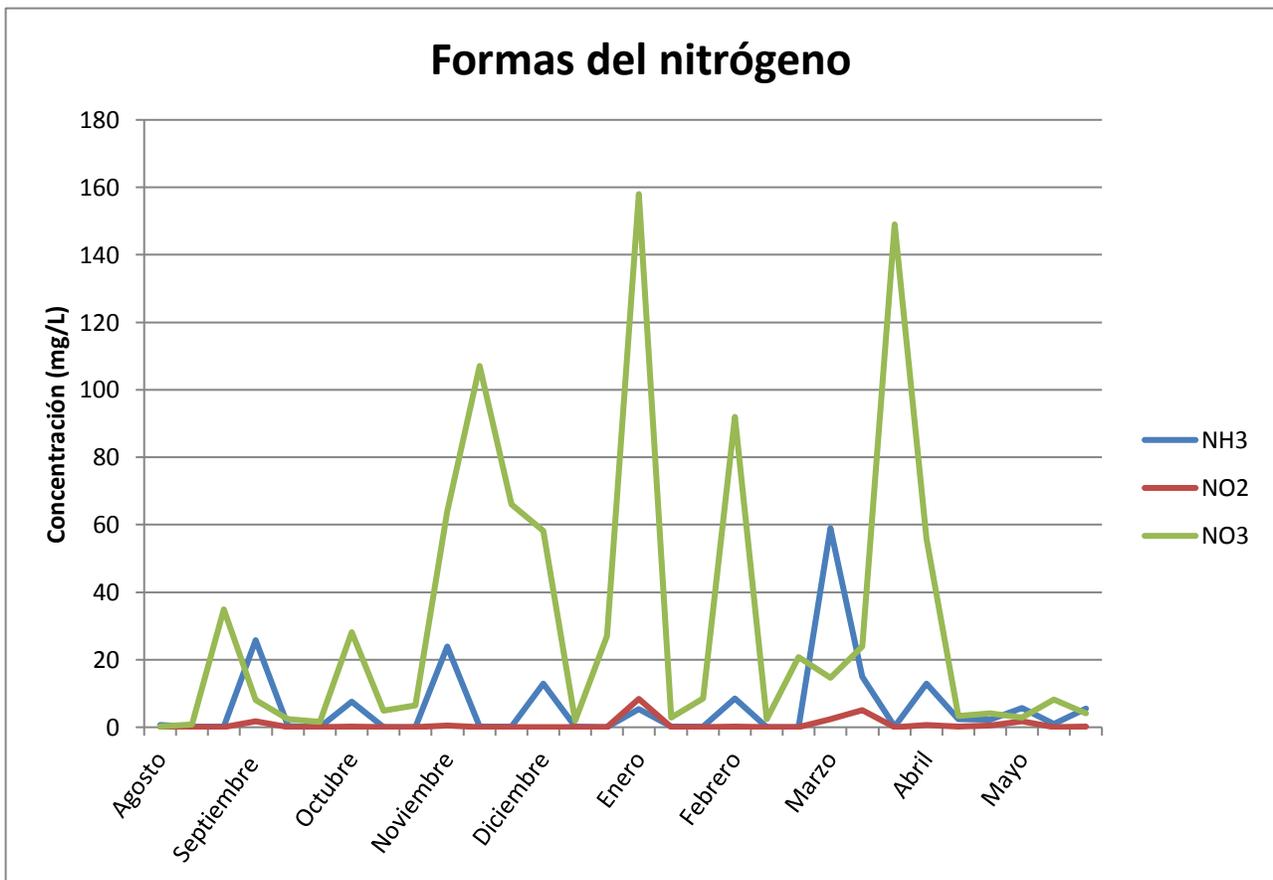


Figura 5. Resultados de Nitrógeno Amoniacal, Nitritos y Nitratos correspondientes a los diez muestreos.

C. Normatividad

NOM 001 y NOM 002

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 6, el agua que es utilizada para el riego y la destinada a la descarga municipal dentro de esta industria, cumple con los límites máximos permisibles de la NOM 001 y 002 en los parámetros de DBO₅, PT y pH. Para SST los muestreos realizados en el mes de octubre, noviembre y enero no cumplen con la norma, así como el mes de marzo para NT. En todos los muestreos, los coliformes fecales se encuentran fuera de norma por lo que resulta de suma importancia el uso de algún método fisicoquímico como la cloración, esto previo a la descarga y a su reúso en riego de áreas verdes con el fin de disminuir las concentraciones en coliformes.

Tabla 6. Valores registrados en la muestra del agua de efluente en DBO₅, SST, NT, PT y pH comparados con la NOM 001 y NOM 002 correspondientes a los diez muestreos.

Muestreo	*DBO ₅	*SST	*NT	*PT	pH	**CF	
Agosto	3	37.5	ND	3.4	7	9.00E+04	
Septiembre	0	35	ND	6.9	7.79	5.00E+05	
Octubre	3.36	95	ND	0.08	8.05	5.00E+05	
Noviembre	7.57	85	ND	3.2	7.91	16.00E+3	
Diciembre	2.94	19	35.04	0.04	8.13	5.00E+04	
Enero	8.37	103	20.01	0.3	8.11	5.00E+5	
Febrero	0	57.5	29.74	0	8.08	4.00E+3	
Marzo	6.95	72	42.3	8.8	8.97	3.00E+5	
Abril	3.43	21.3	20.29	2.5	-	5.00E+4	
Mayo	3.99	23	5.07	1.7	7.92	5.00E+5	
NOM 001	Ríos (Uso público urbano)	75	75	40	20	5 - 10	2,000
NOM 002	Uso público urbano	75	75	40	20	5.5 - 10	2,000

* = mg/L

** = NMP

ND = No determinado

NOM 003

Por su parte, el agua que es utilizada para sanitarios cumple con los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen al servicio público en contacto directo únicamente en el mes de diciembre.

Tabla 7. Valores registrados en la muestra del agua de filtro en CF, DBO₅ y SST comparados con la NOM 003 correspondientes a los diez muestreos.

Muestreo	Parámetro			
	**CF	*DBO ₅	*SST	
Agosto	7	2.41	35	
Septiembre	5.00E+05	0	25	
Octubre	130	4.16	57.5	
Noviembre	>160E+6	0	87.5	
Diciembre	<2	2.94	8	
Enero	8.00E+06	4.99	52.5	
Febrero	<2	3.79	52.5	
Marzo	6	5.49	29	
Abril	9.00E+07	3.12	24	
Mayo	5.00E+04	5.24	23	
NOM 003	Contacto directo (CD)	240	20	20
	Contacto indirecto (CI)	1000	30	30

* = mg/L

** = NMP

D. *Pseudomonas spp.*

Durante los meses de agosto, septiembre, noviembre y diciembre no se detectó la presencia de *Pseudomonas spp.* Únicamente en el mes de octubre se registró su presencia en el influente; y en el mes de abril en el filtro. Durante los meses de enero,

febrero, marzo y mayo se registró la presencia en el efluente y filtro, y se confirmó mediante API.

Tabla 8. Presencia/ausencia de *Pseudomonas spp.* en las muestras correspondientes a los diez muestreos.

Muestreo	Tipo de muestra		
	Influyente	Efluente	Filtro
Agosto	Ausente	Ausente	Ausente
Septiembre	Ausente	Ausente	Ausente
Octubre	Presente	Ausente	Ausente
Noviembre	Ausente	Ausente	Ausente
Diciembre	Ausente	Ausente	Ausente
Enero	Ausente	*Presente	Presente
Febrero	Ausente	*Presente	*Presente
Marzo	Ausente	*Presente	*Presente
Abril	Ausente	Ausente	*Presente
Mayo	Ausente	*Presente	*Presente

*Confirmación con API

E. Parámetros de operación

pH

Los valores de pH oscilaron alrededor de la neutralidad, encontrándose en un rango que va de 6.97 a 8.8, con un promedio de 7.64. La concentración del ion hidrogeno (H⁺), es un indicador de calidad del medio y permite la adecuada proliferación y desarrollo de organismos. Los niveles de pH deben encontrarse entre 4,0 - 9,5, ya que este, es el rango tolerado por las bacterias, existiendo un intervalo óptimo de 6,5 - 7,5 (Morales, 2014), por lo cual el proceso de lodos activados se ve favorecido por éste parámetro.

Oxígeno disuelto (OD)

Los valores de OD se encuentran en un rango de entre 2.24 y 6.11mg/L (tabla 9), en promedio este parámetro registró un valor de 4.48g/L. Este parámetro debe hallarse en concentraciones superiores a 2 mgO₂/L, siendo este valor, el mínimo necesario para el

correcto desarrollo de la biomasa (Metcalf and Eddy, 2003), lo cual se relaciona con las altas eficiencias de remoción de materia orgánica.

Relación de C-N-P

La determinación de nutrientes, realizada en las formas de nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT), presentó valores mayores a 5.07 y menores a 42.3 mg/L para NT; por su parte, para PT se registraron de 0 hasta 8.8 mg/L (tabla 6). Durante el periodo agosto-noviembre la relación no fue determinada debido a que hasta este momento se determinó la importancia de éste parámetro. La relación promedio entre materia orgánica y nutrientes, representada como DBO₅: N: P es de 100: 6.53: 1.17 (tabla 9), ésta comparada con la relación recomendada para un óptimo funcionamiento del sistema, 100: 5: 1, resulta eficiente para todos los casos (Diez *et al.*, 2002; Morales, 2014).

Tabla 9. Valores obtenidos en los parámetros de operación de la planta de tratamiento.

Muestreo	*pH	*OD (mg/L)	Relación Carbono-Nitrógeno-Fósforo de Influyente (%)	Conductividad (µs/cm) Influyente	*IVS (ml/g)	*A/M	DBO ₅ /DQO
Agosto	ND	3.17	ND	2850	85.03	0.04	0.18
Septiembre	6.97	2.24	ND	3200	84.71	0.053	0.38
Octubre	7.4	4.45	ND	4220	78.94	0.017	0.06
Noviembre	7	2.4	ND	5140	52.49	0.134	0.30

Diciembre	7.93	6.11	100 - 5.75 - 0.03	4270	81.82	0.057	0.51
Enero	ND	5.29	100 - 2.56 - 0.38	3280	93.41	0.077	0.18
Febrero	7.56	5.78	100 - 4.17 - 0.50	2710	117.17	0.098	0.40
Marzo	8.8	6.01	100 - 19.95 - 4.02	4270	122.19	0.034	0.24
Abril	7.79	6.09	100 - 6.22 - 0.33	2290	153.22	0.053	0.64
Mayo	ND	3.28	100 - 0.53 - 1.77	2360	92.05	0.102	0.59

* = Valores medidos de los lodos activados.

ND = No determinado

Conductividad

Los valores de conductividad se encuentran en un rango de entre 2290 y 5140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (tabla 9), el valor promedio de este parámetro fue de 3459 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y durante 6 muestreos el valor de conductividad superó los 3.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Valores elevados de conductividad $>3.000 \mu\text{S}/\text{cm}$, afectan al proceso biológico de depuración, impidiendo el desarrollo de una comunidad bacteriana estable, incrementando las bacterias filamentosas, así como también disminuyendo la velocidad de sedimentación (Web 6).

Índice Volumétrico de Sedimentación (IVS)

Para una buena sedimentación se requieren valores inferiores a 100 ml/g ya que estos valores indican un lodo maduro, valores superiores a 150 ml/g ya se relacionan con lodos viejos, lo que propicia un crecimiento filamentoso y mala sedimentación de la biomasa, por lo que puede indicar la necesidad de purga en el sistema. En promedio el IVS se encuentra en los 93.2 ml/g y únicamente durante 3 muestreos este valor supera los 100 ml/g, por lo que en general es posible encontrar una buena sedimentación (Morales, 2014).

La relación Alimento Microorganismos (A/M)

Valores típicos de la relación A/M se encuentran en el rango de 0.2–0.9 kg DBO₅/kgSSV·d, siendo la relación óptima de 0.3-0.6 kg DBO₅/kgSSV·d (Morales, 2014). Los resultados obtenidos (tabla 9), muestran valores inferiores a los rangos típicos, pues éstos se sitúan en un rango entre 0.017 y 0.134 kg DBO₅/kgSSV·d, en ningún caso el valor se encuentra dentro del rango óptimo. Este parámetro puede variar desde la operación del sistema, ya que, la concentración de microorganismos puede ser rectificada aumentando o disminuyendo la purga de lodos (Metcalf and Eddy, 2003). Por otra parte, una de las ventajas de los sistemas de lodos activados por lotes, radica en la capacidad de aumentar o disminuir los tiempos de retención, de tal forma que permita alcanzar las eficiencias de remoción de materia orgánica necesarias con cantidades de lodo diferentes a los establecidos para los flujos continuos y sin afectar los procesos posteriores del sistema (Sánchez, 2016).

Relación DBO₅/DQO

La relación DBO₅/DQO presentó un rango de 0.06 a 0.64, con un promedio de 0.35. Únicamente durante el mes de agosto, octubre y enero este valor se encontró por encima de 0.2. Si la relación (DBO₅/DQO) <0.2 entonces hablamos de unos vertidos de naturaleza industrial, poco biodegradables, pero si ésta es >0.5 entonces hablamos de unos vertidos de naturaleza urbana, o clasificables como urbanos y mucho más biodegradables (Web 9), por lo que los resultados indican que existe una alta biodegradabilidad.

F. Observación simple al microscopio

En este estudio se hizo una observación directa de una muestra de biosólidos encontrados en el reactor biológico. Con un microscopio óptico BOECO-BM180/SP fue posible realizar la observación, misma que puede considerarse como un parámetro para auxiliar al operador de la planta, ya que permite saber las condiciones del sistema de tratamiento. Los organismos observados fueron comparados con el Atlas de ciliados y otros microorganismos frecuentes en el sistema aerobio de aguas residuales (Luna, 2006).

Bacterias

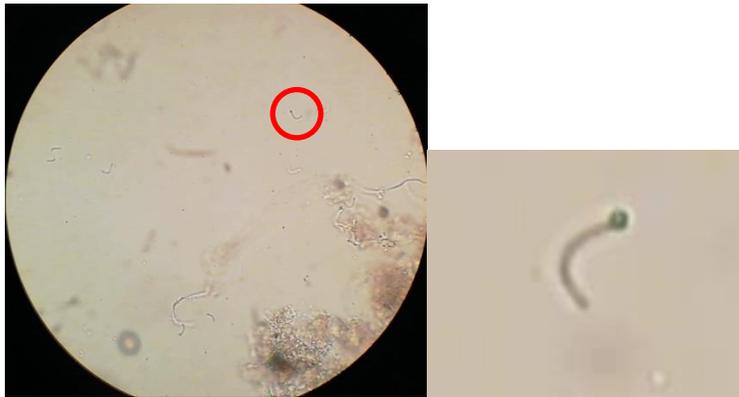


Figura 6. Bacteria filamentosas en los biosólidos. 40x

La presencia de bacterias filamentosas puede ser benéfica, porque en comparación con los organismos que se agrupan en flóculos puede conseguir una mayor toma de nutrientes. Además su forma de organizarse permite captar partículas flotantes. La desventaja de este tipo de bacterias es la baja sedimentabilidad, por lo cual es importante que éstas no se encuentren en exceso (Web 7).

Metazoos

La presencia de rotíferos en los lodos de este sistema es benéfica, ya que estos metabolizan partículas sólidas y se alimentan de protozoos y bacterias, lo que mantiene

un control en el crecimiento de estos. Su presencia se relaciona con una elevada edad de lodos y una buena calidad del efluente (Arcos, 2013).

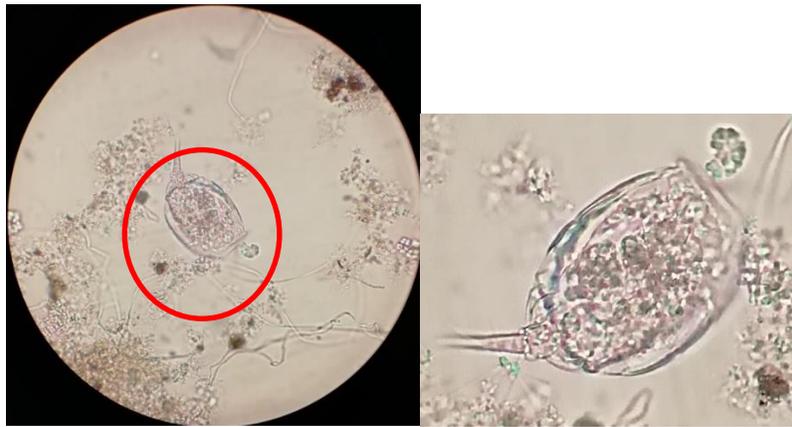


Figura 7. Rotífero presente en los biosólidos. 100x



Figura 8. . Rotífero presente en los biosólidos. 40x



Figura 9. Rotífero presente en los biosólidos. 40x



Figura 10. Rotífero presente en los biosólidos. 40x

Protozoos

Los protozoos son considerados como bioindicadores de las plantas de tratamiento ya que son sensibles a compuestos tóxicos y a la ausencia de oxígeno. Son los principales consumidores de poblaciones bacterianas en los sistemas acuáticos, lo que mantiene un control en el crecimiento de estas poblaciones. Después de las bacterias, son los segundos degradadores de materia orgánica soluble e insoluble, lo que provoca la formación de flóculos.

Ciliados

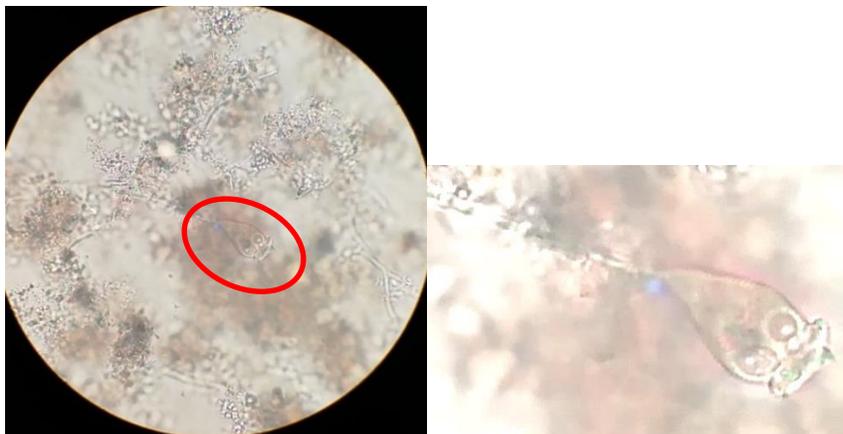


Figura 11. *Vorticella* spp. presente en los biosólidos. 40x



Figura 12. . *Vorticella spp.* presente en los biosólidos. 40x



Figura 13. . *Vorticella spp.* presente en los biosólidos. 40x



Figura 14. *Vorticella spp.* presente en los biosólidos. 40x



Figura 15. *Colpoda* spp. presente en los biosólidos. 10x

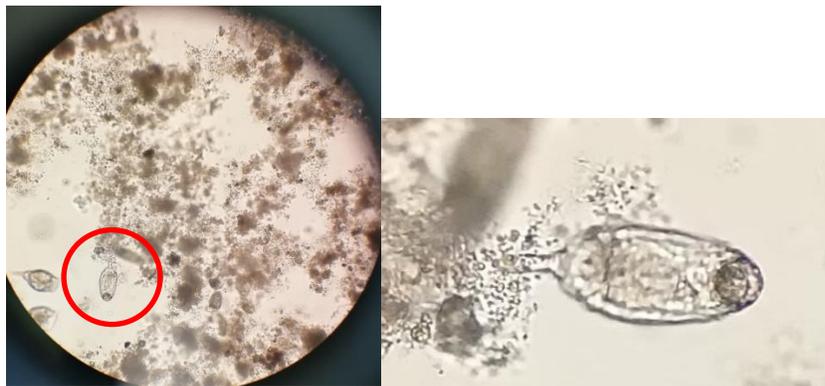


Figura 16. *Opercularia* spp. presente en los biosólidos. 10x



Figura 17. *Paramecium* spp. presente en los biosólidos. 10x

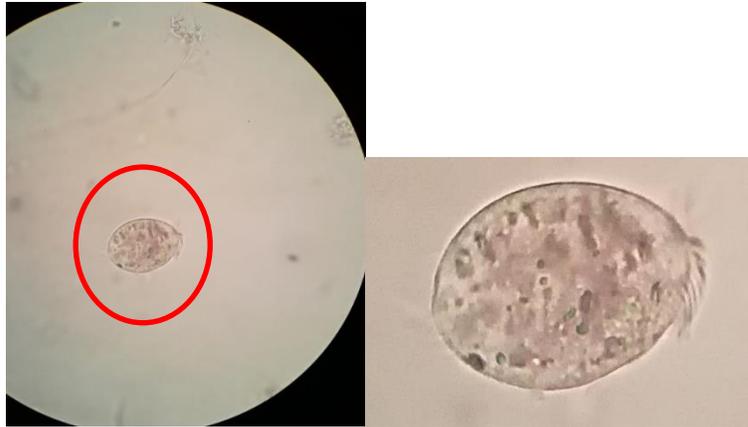


Figura 18. *Oxytrichia* spp. presente en los biosólidos. 40x



Figura 19. *Euplites* spp presente en los biosólidos. 10x Fuente: Web 10, 2020.

Flagelados



Figura 20. *Paranema* spp. presente en los biosólidos. 40x

VII. CONCLUSIONES

La remoción parcial de coliformes totales y fecales fue buena, a pesar de ello en tres muestreos las eficiencias totales se reportaron bajas y nulas, lo que indica que el proceso de desinfección del agua tratada no es constante, por lo que llevar un mejor control en la dosificación del mismo mejoraría la eficiencia de estos parámetros. Por otro lado, la baja remoción parcial ($\leq 50\%$) de los coliformes es normal en el proceso de lodos activados de acuerdo con lo reportado en la literatura.

La presencia de *Pseudomonas aeruginosa* en los sistemas de tratamiento biológico es de suma importancia por su gran capacidad para degradar la materia orgánica, sin embargo, su presencia en algunos muestreos del efluente y el filtro son una clara muestra de su capacidad para sobrevivir y multiplicarse en aguas tratadas aún siendo sometidas a procesos de cloración, lo que podría ser considerado como otro indicador de calidad en este tipo de agua.

La determinación de ortofosfatos en este estudio resulta poco útil debido a que no es un parámetro con valores altos y no está incluido en ninguna normativa a diferencia del fósforo total. No obstante, la determinación de este parámetro tiene una importancia biológica ya que los ortofosfatos son la forma soluble del fósforo absorbida por las plantas, por lo que concentraciones altas de éstos son un motivo de eutrofización en los cuerpos de agua en los que se descargan los efluentes de las plantas de tratamiento.

El efluente del filtro únicamente en diciembre cumplió con los límites máximos permisibles de las NOM 003 para reúso en contacto directo por lo que tener un mejor control en el proceso de cloración que se realiza en el sistema resulta indispensable para mejorar los resultados en coliformes, por su parte, para reducir los sólidos suspendidos se requiere implementar un sistema más eficiente de filtración que permita retener una mayor cantidad de éstos.

El agua utilizada para el riego y la destinada a la descarga municipal cumplió con los límites máximos permisibles de la NOM 001 y 002 en los parámetros de DBO_5 , PT y pH. Por su parte, los SST en tres muestreos registraron valores superiores a los permitidos por la norma, por lo que incrementar el tiempo de retención en el biorreactor ayudaría a

mejorar los resultados. En el caso de los coliformes fecales, en ningún muestreo el valor estuvo dentro de la norma, lo que confirma la necesidad asegurar el proceso de cloración posterior al tratamiento de lodos activados.

El sistema de tratamiento de lodos activados fue muy eficiente ya que tanto la de remoción parcial como la total de DBO₅ y DQO fueron muy altas, mayores a 96.72% en DBO₅ y 80.36% en DQO; mayores a 97.41% en DBO₅ y 72.53% en DQO respectivamente, esto está dentro de lo esperado para estos parámetros según lo reportado por la literatura.

En contraste, las remociones más bajas se registraron en ortofosfatos lo que es muy común en los procesos de lodos activados, sin embargo, las concentraciones son muy bajas, por lo que los vertidos de esta industria no representan un riesgo de eutrofización en los cuerpos de agua.

La correcta degradación de materia orgánica fue claramente observada con los valores de remoción de DBO₅ y se confirma con los valores registrados de nitrógeno amoniacal, nitritos y nitratos, lo que muestra el buen funcionamiento del sistema.

El valor en la relación F/M fue muy baja, a pesar de ello la eficiencia de este sistema es muy buena pues una de las ventajas de los sistemas por lotes radica en la capacidad de aumentar o disminuir los tiempos de retención, de tal forma que permita alcanzar las eficiencias de remoción de materia orgánica necesarias. Los valores de pH oscilaron alrededor de la neutralidad y la relación de nutrientes (C-N-P) fue de 100: 6.53: 1.17, lo que permitió un óptimo funcionamiento del sistema ya que están muy cercanos a los valores ideales. En promedio el IVS se registró en los 93.2 ml/g, por consecuencia existe una buena sedimentación en el sistema. La relación entre DQO y DBO₅ indica que existe una alta biodegradabilidad del agua que se trata.

VIII. RECOMENDACIONES

Los niveles de oxígeno disuelto están muy por encima de los niveles necesarios para el correcto funcionamiento del sistema, por lo que mantener concentraciones tan altas implica un gasto innecesario de energía, y a su vez incrementa costos en el tratamiento del agua. Es por ello que resulta pertinente regular el ingreso de O_2 manteniendo los niveles en 2 mg O_2 /L, lo que implica la disminución manual de la apertura de la válvula que permite la aireación en el biorreactor, para que las bombas trabajen a menor velocidad.

El sistema de filtración con antracita resulta deficiente para la remoción de sólidos suspendidos, color, sílice y ortofosfatos de esta planta de tratamiento, por lo que cambiar el sistema por alternativas como filtración con arena, puede ayudar a aumentar la remoción de sólidos suspendidos principalmente, parámetro que resulta de suma importancia, ya que está incluido en la NOM 003, y los valores obtenidos en la planta de tratamiento no cumplen con los límites máximos permisibles de la misma.

El uso de pruebas bioquímicas para la identificación de patógenos como lo es *Pseudomonas spp.* en muchas ocasiones no es suficiente para determinar la presencia de la misma, esto puede deberse a errores metodológicos o la falta de experiencia del analista, por lo que el uso de pruebas alternativas como sistemas API para corroborar la presencia de patógenos nos permite tener mayor certeza en los resultados obtenidos.

La observación simple al microscopio de organismos presentes en los lodos que se encuentran en el biorreactor nos permite conocer la actividad que en éste se presenta, ya que la diversidad de estos organismos son indicio de las condiciones del sistema de tratamiento, por lo que implementarla en las plantas de tratamiento resulta como una herramienta primordial a los parámetros de operación.

Por los valores obtenidos en coliformes en este estudio, podemos notar que proceso de desinfección del agua tratada no es constante, por lo que llevar un control en la dosificación del mismo mejoraría los resultados del sistema de tratamiento.

Los lodos que se producen como desecho del pretratamiento realizado para el agua residual proveniente de las pastas dentales cumple la NOM 004 para poder ser destinada a destrucción dentro de esta industria, no obstante éste debería ser sometido a la NOM 052 ya que éste no es un residuo biológico sino un residuo industrial no peligroso. Por otra parte, las purgas de lodo que se generan del proceso biológico de lodos activados sí deberían ser sometidos a un tratamiento para cumplir con la NOM 004 para evitar ser descargadas al municipio sin un tratamiento.

IX. BIBLIOGRAFÍA

APHA-AWWA-WEF. 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington D.C.

Arcos, Y. A. 2013. Microbiology of the activated sludge. *Hechos Microbiol*, 4(2), 117-122.

Basulto, S. Y., Giacomán, V. G., Pacheco, A. J., Quintanal, F. C., Ponce, C. C. 2010. Cuantificación de las principales bacterias patógenas presentes en aguas residuales domésticas crudas y tratadas de la Ciudad de Mérida Yucatán, México. Memorias del 2nd IWA Mexico Young Water Professional Conference 2010. Instituto de Ingeniería UNAM y Young Water Professionals. 12 a 14 abril de 2010. Campo Juriquilla Querétaro México.

Belmonte, M., Calderón, M., Chamorro, S., Vidal, G. 2006. Gestión Ambiental de la Industria de Celulosa en Chile. 30° Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS. Uruguay

García, L., Iannacone, J. 2014. Pseudomonas aeruginosa un indicador complementario de la calidad de agua potable: análisis bibliográfico a nivel sudamérica. *The Biologist*, 12 (1), 133-152.

Castillo, A., Osorio, Y., Vence, L. 2009. Evaluación de la calidad microbiológica y fisicoquímica de aguas subterráneas ubicadas en los municipios de la Paz y San Diego-Cesar. Tesis de licenciatura. Universidad popular del cesar. Facultad de Ciencias de la Salud. Colombia.

CONAGUA. 2014. *Estadísticas del Agua en México*. CONAGUA México. p.104-108.

CONAGUA. 2016. *Estadísticas del Agua en México*. CONAGUA. México. p.124-128.

CONAGUA. 2016. Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Lodos Activados. CONAGUA. México. p.1-16.

Diez, M. C., Villouta, F., Montoya, M. T., Bornhardt, C. 2002. Tratamiento combinado de lodos activados y lecho fijo sumergido para tratar efluente de celulosa kraft blanqueada. 27° Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. AIDIS. Cancún, México.

Jiménez, C. B. E. 2001. La Contaminación Ambiental en México. Ed Limusa. Méx. 925 p.

Luna, P. V. M. 2006. Atlas de ciliados y otros microorganismos frecuentes en el sistema aerobio de aguas residuales. LME. FQ. UNAM. 112 p.

Martínez, H. S., Coronel, O. C., Hernández, M. A., Miranda, L. J. M., Rodríguez, Á. J. A. 2008. Control de la calidad del agua tratada en una depuradora a través de los Bioindicadores bacterianos *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*. Laboratorio de Ciencias Ambientales.

Martinez, M. D. A. 2014. Remoción de bacterias, nutrientes y materia orgánica en un sistema de tratamiento biológico de aguas residuales de una industria textil. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, México.

Madigan, T. M., Martinko, M. J., Dunlap, V. P., Clark, P. D. 2009. Brock. Biología de los microorganismos. Duodécima edición. Pearson. México. 1296 pp.

Mas, M., Gómez, N., Vasco, J., Salvadó, H. 2008. Caracterización de los microorganismos de depuradoras biológicas urbanas de fangos activos con tratamiento convencional y de eliminación de nutrientes de las comarcas de Lérida. Hydrolab Microbiologica.

Metcalf and Eddy. 2003. Wastewater Engineering: Treatment, and Reuse. McGraw-Hill, New York, USA, 1485 pp.

Molina, A. M., Tigreros, G. J. L. 2005. Evaluación preliminar de la remoción de sólidos suspendidos en el sistema de tratamiento de aguas residuales del municipio de Arauca, trabajo de investigación. Universidad Nacional de Colombia sede Arauca Ingeniería Ambiental Arauca.

Morales, B. G. R. 2014. Evaluación de la Estabilidad de un sistema de Lodos Activados mediante Indicadores Físicoquímicos y Biológicos. Tesis de Licenciatura. Universidad de Concepción, Centro de Ciencias Ambientales EULA-CHILE. Chile

Muñoz, C. M. 2008. Caracterización y tratamiento de aguas residuales (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. p.161-259.

Ramírez, E., Robles, E., Sainz, M. G., Martínez, B., Ayala, R., González, M. E. 2014. Microbiological and Physicochemical Characteristics of an Activated Sludge System Treating Textile Wastewater. *World Journal of Environmental Biosciences*. 3(1): 81-87.

Ramirez, E., Robles, E., Martinez, B., Choncohua, E., Gonzalez, M. E., Galan, G. 2015. Microbiological and Physicochemical Characteristics of a Pilot Plant of Activated Sludge. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 4(6): 1236-1240.

Reyes, L. M. G. 2016. Uso de cloro en las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas, desinfección y formación de subproductos (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico Nacional, México. p. 36-67.

Robles E., Ramírez E., Martínez B., Ayala R., González M.E., Alarid, B. 2006. Remoción de materia orgánica y bacterias coliformes en el sistema de lodos activados en la planta de Ciudad Universitaria. Memorias del III Simposio 49 Internacional en Ing y Ciencias para la Sustentabilidad Ambiental. UAM Atzacapozalco.

Rodríguez, F. A. A., Letón, G. P., Rosal, G. R., Dorado, V. M., Villar, F. S., Sanz, G. J. M. 2006. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. Madrid. Fundación CEIM. p.16-17.

Saldarriaga, J. C., Hoyos, D. A., Correa, M. A. 2011. Evaluación de procesos biológicos unitarios en la remoción simultánea de nutrientes para minimizar la eutrofización, Revista EIA, ISSN 1794-1237 No. 15, p. 129-140. Julio 2011, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín Colombia.

Sánchez, V. J. U. 2016. Aclimatación de un proceso de lodos activados para tratar aguas residuales de la industria textil (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. México. p. 12-34.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de junio de 1998.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996 que establece los límites máximos permisibles de

contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 3 de junio de 1998.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). Norma Oficial Mexicana NOM-003-ECOL-1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 21 de septiembre de 1998.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). 2012. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, 2012. Compendio de Estadísticas Ambientales. México.

Villaseca, M. 2001. Observación microscópica de fangos activados en los tratamientos de depuración biológica. Boletín INTEXTER (U.P.C.), 119:67-72.

Web 1. CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2010. El agua en México: causas y encauses. Recuperado el 01/07/18, de <http://www.CONAGUA.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2010-16Junio2010.pdf>

Web 2. CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2011. Usos del agua. Recuperado el 10/08/18, de http://www.CONAGUA.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/SINA/Capitulo_3.pdf

Web 3. INCyTU (Oficina de Información Científica y Tecnológica para el Congreso de la Unión). 2019. Tratamiento de aguas residuales. Recuperado el 24/09/19, de https://www.foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU_19-028.pdf

Web 4. SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca). 2002. Normas Oficiales Mexicanas: Calidad del agua residual. Recuperado el 24/09/19, de http://www.paot.org.mx/centro/inesemarnat/informe02/estadisticas_2000/compendio_2000/04dim_institucional/04_02_Normatividad/data_normatividad/RecuadroIV.2.2.htm

Web 5. Manual de depuración de aguas residuales urbanas. Recuperado el 05/11/19, de <http://alianzaporelagua.org/documentos/MONOGRAFICO3.pdf>

Web 6. Análisis de aguas residuales. Recuperado el 19/11/19, de http://a21-granada.org/red-gramas/images/Presentacion_ANTONIO.pdf

Web 7. Crecimiento en exceso de bacterias filamentosas. Recuperado el 17/12/19, de <https://www.lenntech.es/microorganismos-filamentosos.htm>

Web 8. Eliminación de sílice por intercambio de iones. Recuperado el 17/12/19, de <https://es.pureaqua.com/eliminacion-de-silice-por-intercambio-de-iones/>

Web 9. La calidad del agua. Recuperado el 20/12/19, de http://www.cma.gva.es/areas/educacion/educacion_ambiental/educ/publicaciones/ciclo_de_l_agua/cicag/2/2_5_1/main.html

Web 10. Ciliate. Recuperado el 20/02/20, de <https://www.alamy.es/imagenes/ciliate.html>

X. ANEXOS

Anexo 1. Tabla de valores fisicoquímicos y bacteriológicos obtenidos en los cuatro puntos de muestreo durante el mes de agosto 2018.

Parámetro	Unidad	Lodos	Influyente	Efluente	Filtro
CT	NMP	-	> 16.00E+08	9.00E+4	17
CF	NMP	-	3.00E+07	9.00E+4	7
DBO ₅	mg/L	-	512	3	2.41
DQO	mg/L	-	2832	73	10
NH ₃	mg/L	-	0.6	0.16	0.13
PT	mg/L	-	7.85	3.46	3.1
PO ₄	mg/L	-	5.65	2.64	2.56
NO ₃	mg/L	-	0.23	0.9	35
NO ₂	mg/L	-	0.257	0.03	0.02
ST	mg/L	9683	1355	1418	1338
SST	mg/L	8350	180	37.5	35
SSV	mg/L	6220	130	30	35
Color verdadero	UPC	-	40	20	10
Conductividad	µs/cm	2850	-	-	-
Sílice	mg/L	-	41	21	24
pH	-	-	6	7	7.5
Temperatura	°C	28.9	-	-	-
OD	mg/L	3.17	-	-	-

Anexo 2. Tabla de valores fisicoquímicos y bacteriológicos obtenidos en los cuatro puntos de muestreo durante el mes de septiembre 2018.

Parámetro	Unidad	Lodos	Influyente	Efluente	Filtro
CT	NMP	-	> 16.00E+08	5.00E+5	5.00E+5
CF	NMP	-	> 16.00E+08	5.00E+5	5.00E+5
DBO ₅	mg/L	-	572	0	0
DQO	mg/L	-	1497	76	50
NH ₃	mg/L	-	25.8	0.35	0.1
PT	mg/L	-	7.44	6.97	11.94
PO ₄	mg/L	-	6.35	8.35	65.54
NO ₃	mg/L	-	8.1	2.32	1.58
NO ₂	mg/L	-	1.72	0.078	0.021
ST	mg/L	8333	2215	585	1120
SST	mg/L	7083	165	35	25
SSV	mg/L	5200	130	22.5	20
Color verdadero	UPC	-	50	30	0
Conductividad	µs/cm	3200	-	-	-
Sílice	mg/L	-	210	190	53
pH	-	6.97	6.49	7.79	7.94
Temperatura	°C	32.2	-	-	-
OD	mg/L	2.24	-	-	-

Anexo 3. Tabla de valores fisicoquímicos y bacteriológicos obtenidos en los cuatro puntos de muestreo durante el mes de octubre 2018.

Parámetro	Unidad	Lodos	Influyente	Efluente	Filtro
CT	NMP	-	3.00E+8	5.00E+5	240
CF	NMP	-	3.00E+8	5.00E+5	130
DBO ₅	mg/L	-	173	3.36	4.16
DQO	mg/L	-	2832	73	10
NH ₃	mg/L	-	7.6	0.07	0.09
PT	mg/L	-	0.923	0.083	0.191
PO ₄	mg/L	-	0.732	0.04	0.176
NO ₃	mg/L	-	28.1	4.9	6.5
NO ₂	mg/L	-	0.248	0.005	0.005
ST	mg/L	9150	715	1740	2238
SST	mg/L	6967	175	95	57.5
SSV	mg/L	4917	125	35	40
Color verdadero	UPC	-	40	40	0
Conductividad	µs/cm	4220	-	-	-
Sílice	mg/L	-	10	14	13
pH	-	7.4	7	8.05	8.51
Temperatura	°C	30.7	-	-	-
OD	mg/L	4.45	-	-	-

Anexo 4. Tabla de valores fisicoquímicos y bacteriológicos obtenidos en los cuatro puntos de muestreo durante el mes de noviembre 2018.

Parámetro	Unidad	Lodos	Influyente	Efluente	Filtro
CT	NMP	-	> 16.00E+13	16.00E+3	16.00E+7
CF	NMP	-	> 16.00E+08	16.00E+3	16.00E+7
DBO ₅	mg/L	-	1596	7.57	0
DQO	mg/L	-	5340	21	28
NH ₃	mg/L	-	23.9	0.16	0.24
PT	mg/L	-	2.173	3.228	6.776
PO ₄	mg/L	-	1.965	4.782	8.558
NO ₃	mg/L	-	64	107	66
NO ₂	mg/L	-	0.56	0.052	0.026
ST	mg/L	9583	4035	1935	2045
SST	mg/L	8383	365	85	87.5
SSV	mg/L	5733	305	52.5	62.5
Color verdadero	UPC	-	40	40	30
Conductividad	µs/cm	5140	-	-	-
Sílice	mg/L	-	180	170	160
pH	-	7	4.91	7.91	7.98
Temperatura	°C	34.9	-	-	-
OD	mg/L	2.4	-	-	-

Anexo 5. Tabla de valores fisicoquímicos y bacteriológicos obtenidos en los cuatro puntos de muestreo durante el mes de diciembre 2018.

Parámetro	Unidad	Lodos	Influyente	Efluente	Filtro
CT	NMP	-	> 16.00E+16	5.00E+4	< 2
CF	NMP	-	> 16.00E+16	5.00E+4	< 2
DBO ₅	mg/L	-	609	2.94	2.94
DQO	mg/L	-	1196	37	34
NH ₃	mg/L	-	13	0.19	0.01
PT	mg/L	-	0.185	0.043	0.125
PO ₄	mg/L	-	0.172	0.031	0.08
NO ₃	mg/L	-	582	2	27
NO ₂	mg/L	-	0.1	0.034	0.039
ST	mg/L	9050	2883	2215	1846
SST	mg/L	7333	300	19	8
SSV	mg/L	5150	230	15	8
Color verdadero	UPC	-	40	30	0
Conductividad	µs/cm	4270	-	-	-
Sílice	mg/L	-	120	80	70
pH	-	7.93	7	8.13	8.45
Temperatura	°C	32.1	-	-	-
OD	mg/L	6.11	-	-	-

Anexo 6. Tabla de valores fisicoquímicos y bacteriológicos obtenidos en los cuatro puntos de muestreo durante el mes de enero 2019.

Parámetro	Unidad	Lodos	Influyente	Efluente	Filtro
CT	NMP	-	9.00E+4	9.00E+5	8.00E+6
CF	NMP	-	7.00E+4	5.00E+5	8.00E+6
DBO ₅	mg/L	-	784	8.37	4.99
DQO	mg/L	-	4352	109	28
NH ₃	mg/L	-	5.4	0.14	0.19
PT	mg/L	-	2.97	0.303	1.35
PO ₄	mg/L	-	0.653	0.391	1.444
NO ₃	mg/L	-	158	2.82	8.54
NO ₂	mg/L	-	8.4	0.082	0.058
ST	mg/L	8633	2725	2128	2275
SST	mg/L	6316	230	103	52.5
SSV	mg/L	4917	140	82.5	35
Color verdadero	UPC	-	30	60	20
Conductividad	µs/cm	3280	-	-	-
Sílice	mg/L	-	140	140	150
pH	-	-	9.26	8.11	7.79
NT	mg/L	-	20.1	-	-
Temperatura	°C	33.8	-	-	-
OD	mg/L	-	-	-	-

Anexo 7. Tabla de valores fisicoquímicos y bacteriológicos obtenidos en los cuatro puntos de muestreo durante el mes de febrero 2019.

Parámetro	Unidad	Lodos	Influyente	Efluente	Filtro
CT	NMP	-	54.00E+8	4.00E+3	<2
CF	NMP	-	54.00E+8	4.00E+3	<2
DBO ₅	mg/L	-	715	0	3.79
DQO	mg/L	-	1782	90	110
NH ₃	mg/L	-	8.6	0.06	0.09
PT	mg/L	-	3.6	0	1.12
PO ₄	mg/L	-	2.69	0	1.19
NO ₃	mg/L	-	92	2.38	20.74
NO ₂	mg/L	-	0.204	0.018	0.061
ST	mg/L	6350	2115	2370	2543
SST	mg/L	4950	220	57.5	52.5
SSV	mg/L	3500	165	40	45
Color verdadero	UPC	-	40	40	0
Conductividad	µs/cm	2710	-	-	-
Sílice	mg/L	-	120	100	0
pH	-	7.56	5.35	8.08	8.27
NT	mg/L	-	29.79	-	-
Temperatura	°C	-	-	-	-
OD	mg/L	5.78	-	-	-

Anexo 8. Tabla de valores fisicoquímicos y bacteriológicos obtenidos en los cuatro puntos de muestreo durante el mes de marzo 2019.

Parámetro	Unidad	Lodos	Influyente	Efluente	Filtro
CT	NMP	-	13.00E+7	3.00E+5	6
CF	NMP	-	13.00E+7	3.00E+5	6
DBO ₅	mg/L	-	212	6.95	5.49
DQO	mg/L	-	896	176	140
NH ₃	mg/L	-	59	15	0.23
PT	mg/L	-	8.53	8.86	2.5
PO ₄	mg/L	-	4.65	5.79	2.27
NO ₃	mg/L	-	14.6	24	149
NO ₂	mg/L	-	2.4	5	0
ST	mg/L	6833	2870	2887	3115
SST	mg/L	4583	600	72	29
SSV	mg/L	3033	315	46	15
Color verdadero	UPC	-	280	60	10
Conductividad	µs/cm	4270	-	-	-
Sílice	mg/L	-	260	190	190
pH	-	8.8	8.6	8.97	8.64
NT	mg/L	-	42.3	-	-
Temperatura	°C	-	-	-	-
OD	mg/L	6.01	-	-	-

Anexo 9. Tabla de valores fisicoquímicos y bacteriológicos obtenidos en los cuatro puntos de muestreo durante el mes de abril 2019.

Parámetro	Unidad	Lodos	Influyente	Efluente	Filtro
CT	NMP	-	16.00E+8	5.00E+4	5.00E+4
CF	NMP	-	16.00E+8	5.00E+4	5.00E+5
DBO ₅	mg/L	-	326	3.43	3.12
DQO	mg/L	-	506	86	139
NH ₃	mg/L	-	12.9	2.39	2.22
PT	mg/L	-	1.085	2.585	2.839
PO ₄	mg/L	-	0.717	1.762	1.845
NO ₃	mg/L	-	55.79	3.35	4.14
NO ₂	mg/L	-	0.71	0.152	0.564
ST	mg/L	5783	1457	2119	2203
SST	mg/L	3916	103	21.3	24
SSV	mg/L	2966	90	13.3	16
Color verdadero	UPC	-	40	30	30
Conductividad	µs/cm	2290	-	-	-
Sílice	mg/L	-	230	210	180
pH	-	7.79	6.53	-	8.14
NT	mg/L	-	20.29	-	-
Temperatura	°C	28.2	-	-	-
OD	mg/L	6.09	-	-	-

Anexo 10. Tabla de valores fisicoquímicos y bacteriológicos obtenidos en los cuatro puntos de muestreo durante el mes de mayo 2019.

Parámetro	Unidad	Lodos	Influyente	Efluente	Filtro
CT	NMP	-	24.00E+5	5.00E+5	5.00E+4
CF	NMP	-	24.00E+5	5.00E+5	5.00E+4
DBO ₅	mg/L	-	952	3.99	5.24
DQO	mg/L	-	1603	145	167
NH ₃	mg/L	-	5.7	1	5.5
PT	mg/L	-	16.84	1.72	4.05
PO ₄	mg/L	-	11.85	1.16	2.93
NO ₃	mg/L	-	2.91	8.26	4.15
NO ₂	mg/L	-	1.69	0.049	0.136
ST	mg/L	7775	2340	2128	2379
SST	mg/L	5975	175	23	23
SSV	mg/L	4500	145	18	13
Color verdadero	UPC	-	90	50	50
Conductividad	µs/cm	2360	-	-	-
Sílice	mg/L	-	170	150	150
pH	-	-	5.18	7.92	8.09
NT	mg/L	-	5.07	-	-
Temperatura	°C	-	-	-	-
OD	mg/L	3.28	-	-	-